HAL
open science

Ancrages par bossage dans les hourdis de ponts

Francisco Millanes Mato

To cite this version:

Francisco Millanes Mato. Ancrages par bossage dans les hourdis de ponts. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1979. Français. NNT : . tel-00529503

HAL Id: tel-00529503

https://pastel.hal.science/tel-00529503

Submitted on 26 Nov 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NS 20038 (4)
E.1

THESE de DOCTEUR-INGENIEUR

présentée

à l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

par

Francisco MILLANES MATO

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR

Sujet de la Thèse : Ancrages par bossage dans les hourdis de ponts.

I.- Etude théorique et expérimentale

SOUTENUE LE 11 JUIN 1979 DEVANT LE JURY COMPOSE DE:

M. Jean SALENÇON	Président
MM. Robert CHAUSSIN	Examinateurs
Michel FREMOND	
Michel KAVYRCHINE	
Jean LEMAITRE	
Jacques TRINH	

21
21 r
E.N.P.C.
INV03795

THESE de DOCTEUR-INGENIEUR

présentée

à l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

par

Francisco MILLANES MATO

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR

Sujet de la Thèse : Ancrages par bossage dans les hourdis de ponts.

I.- Etude théorique et expérimentale

SOUTENUE LE 11 JUIN 1979 DEVANT LE JURY COMPOSE DE:

M. Jean SALENÇON	Président
MM. Robert CHAUSSIN	Examinateurs
Michel FREMOND	
Michel KAVYRCHINE	
Jean LEMAITRE	
Jacques TRINH	

A todos los que trabajamos juntos
en MART - 2 (Octubre 1973 -
Octubre 1976)

REMERCIEMENTS

Je tiens à présenter mes respectueux remerciements à M. SALENÇON, Responsable de la Formation au Doctorat à l'E N P C, qui a bien voulu me permettre d'effectuer cette recherche sous sa direction.

Qu'il me soit permis d'y associer M.M. les Professeurs LEMAITRE, FREMOND et CHAUSSIN, pour l'intérêt bienveillant qu'ils ont accordé à ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à M. KAVYRCHINE qui m'a fait l'honneur de m'accueillir au Service d'Etude des Structures, et qui a manifesté un intérêt constant pour le sujet de la thèse.

Ma sincère reconnaissance à M. TRINH, Ingénieur au Service d'Etude des Structures, pour l'intérêt et les enseignements qu'il m'a accordés pendant tout ce travail.

Je ne saurais oublier M.M. DEMOULIN, VILLATOUX et AUDOUSSET, Ingénieurs au Service Informatique, dont l'aide a été constante au cours de la mise au point des programmes.

Qu'il me soit permis d'exprimer mes sincères remerciements à tout le Personnel , tant du Centre d'Essais des Structures, que de la Bibliothèque et du Service de Reproduction, pour les services qui m'ont été gentiment rendus.

Je ne veux pas oublier Alicia, Sol et Jean Marie qui m'ont beaucoup aidé lors de l'exécution matérielle de la thèse.

J'exprime ma sympathie la plus sincère aux Ingénieurs et Camarades Stagiaires Bernard, Alain, Ahmed, Reza, Jean Marie, Philippe, Nabil, Antonio, Michel, Mohamed, Nader, Ali, Michel, pour la chaleureuse ambiance et l'amitié dont ils m'ont entouré.

Je remercie enfin l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées pour l'octroi d'une bourse d'études qui a contribué à mon séjour à PARIS.

TABLE DE MATIERES

	Pages
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION	1
1.1. - Généralités	1
1.2. - Objet et intérêt de l'étude	2
1.3. - Position du problème	4
1.4. - Revue des études antérieures - Recherche du L.C.P.C.	5
1.5. - Plan d'étude	11
CHAPITRE 2 - APPLICATION DE LA METHODE DES COUPURES	15
2.1. - Principe du calcul et hypothèses principales	15
2.2. - Améliorations apportées	17
2.3. - Résolution de la méthode	20
2.3.1. Convention de signes et dimensions	20
2.3.2. Calcul des différentes sous-structures	20
2.3.2.1. Bandes n'ayant pas de bossages	20
2.3.2.2. Bandes comportant un bossage	34
2.3.3. Conditions de liaison hourdis-parois latérales	46
2.3.4. Formation du système d'équations	49
2.3.5. Résolution du système	51
2.3.6. Obtention des contraintes	52
2.3.6.1. Bandes n'ayant pas d'ancrage	52
2.3.6.2. Bandes munies de bossage	52
2.3.7. Programmation sur ordinateur	53
Organigramme	54
2.4. - Limitations de la méthode	55
CHAPITRE 3 - APPLICATION DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS	57
3.1. - Introduction	57
3.2. - Calcul des structures en béton armé par la méthode des éléments finis	57
3.2.1. Considérations générales	58
3.2.2. Approximation du calcul non linéaire par l'intermédiaire d'une suite d'analyses linéaires	59

A - ETUDE BIDIMENSIONNELLE

3.3. - Idéalisation de la structure en éléments finis 63

3.3.1. Type d'éléments 63

3.3.2. Convention de signes 64

3.3.3. Eléments de béton 64

3.3.4. Eléments d'acier 66

3.3.5. Eléments de liaison hourdis-parois latérales 68

3.4. - Lois de comportement des matériaux 69

3.4.1. Acier 69

3.4.2. Béton 69

3.4.2.1. Résistance 72

3.4.2.2. Valeurs des déformations ultimes 75

3.4.2.3. Les lois contraintes-déformations 75

3.4.3. Obtention de la matrice $[D]_T$ pour le béton non fissuré

3.4.3.1. Hypothèses 81

3.4.3.2. Définition de $[D^*]_T$ en coordonnées locales 82

3.4.3.3. Expression de $[D]_T$ en coordonnées globales 88

3.4.4. Obtention de la matrice $[D]_T$ pour le béton fissuré 89

3.5. - La matrice de raideur $[K]_T$ globale 91

3.5.1. Obtention 91

3.5.2. Stockage 92

3.6. - Résolution du système 93

3.7. - Calcul des contraintes 94

3.7.1. Evaluation des forces non équilibrées 94

3.7.2. Evaluation des contraintes aux noeuds des éléments 96

3.8. - Programme de calcul bidimensionnel 97

Organigramme 98

B - ETUDE COMBINEE DES EFFORTS PLANS ET DE FLEXION

3.9. - Généralités 101

3.10.- Hypothèses adoptées 101

3.11.- Type d'élément utilisé 104

3.12.- Obtention de la matrice de raideur tangente $[K]_T$, et résolution du problème 107

3.13.- Obtention des forces non équilibrées 111

3.14.- Programmation par ordinateur 112

Organigramme 115

CHAPITRE 4 - ETUDE EXPERIMENTALE 119

4.1. - Programme des essais 119

4.2. - Corps d'épreuve 120

4.2.1. Caractéristiques géométriques 120

4.2.2. Armatures passives 121

4.2.2.1. Ferraillage des âmes 121

4.2.2.2. Ferraillage du hourdis 125

4.2.3. Le béton 125

4.2.4. Câble de précontrainte 126

4.3. - Exécution des essais 126

4.3.1. Dispositif expérimental 127

4.3.2. Dispositif de mesure 127

4.3.2.1. Jauges béton 127

4.3.2.2. Jauges acier 127

4.3.3. Tableau de chargement et phases de mesure 128

CHAPITRE 5 - ANALYSE DES RESULTATS 133

5.1. - Résultats obtenus par la méthode des coupures 133

5.1.1. Cas étudiés 133

5.1.2. Influence du rapport $\gamma = b_0/b$, et des conditions d'encastrement 135

5.1.2.1. Vérification des conditions d'équilibre 135

5.1.2.2. Etude des contraintes longitudinales σ_x 136

5.1.2.3. Contraintes transversales σ_y 146
5.1.2.4. Etat de contraintes dans les parois latérales 147
5.1.2.5. Contraintes principales 150
5.1.3. Influence de la longueur du bossage 151
5.1.4. Influence des dimensions relatives bossage-hourdis et de l'excentrement du câble 152
5.1.5. Effet du groupement de bossages 154
5.1.5.1. Deux bossages 154
5.1.5.2. Trois bossages 161
5.2. - Résultats obtenus par laméthode des éléments finis 165
5.2.1. Etude bidimensionnelle 166
5.2.2. Etude tridimensionnelle 171
5.2.3. Influence d'une traction uniforme dans le hourdis 187
5.3. - Comparaison avec les résultats expérimentaux 188
5.3.1. Corps d'épreuve à échelle réduite 188
5.3.1.1. Un seul bossage (corps d'épreuve A) 191
5.3.1.2. Deux bossages (corps d'épreuve B) 194
5.3.1.3. Trois bossages (corps d'épreuve C) 198
5.3.2. Corps d'épreuve à grandeur réelle 199
CHAPITRE 6 - CONCLUSIONS 205
BIBLIOGRAPHIE 217

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.I. - Généralités

Le présent travail concerne un point important dans la construction des ponts : le comportement des bossages d'ancrage de câbles de précontrainte.

La construction de ponts par encorbellements successifs a connu depuis 1970 environ un développement particulièrement important. Ce procédé permet de supprimer le cintre et d'économiser beaucoup de coffrage et s'est avéré économique pour franchir des portées comprises entre 50 et 150 mètres environ, et quand un cintre est coûteux ou impossible.

Rappelons tout d'abord que cette technique consiste à construire le tablier du pont en console, par avancées successives à partir des appuis (piles ou culées) sur lesquels il est encastré (provisoire ou définitivement). Ce qui permet de se passer des cintres et des échafaudages continus au sol. Chaque tranche de tablier, appelée voussoir, est construite en encorbellement à partir de la précédente, et assemblée à elle par la mise en tension de câbles enfilés au travers de la partie déjà construite dans des gaines réservées à cet effet, puis tendus et ancrés à l'extrémité libre du nouveau voussoir.

Pendant la construction, l'ouvrage fonctionne en console, sous l'action de son propre poids et ses surcharges de chantier. Les premiers ouvrages étaient articulés en milieu de travée, mais ce système présente quelques inconvénients :

a) Les flèches prises par les consoles au cours de la construction, ne peuvent être estimées que de façon approximative. Il y a donc un risque appréciable d'avoir des différences de niveau importantes entre les extrémités des deux consoles au moment de l'assemblage. Si bien que l'égalité des niveaux peut être rétablie, cela ne permet pas celle des pentes et un point anguleux apparaît.

b) Même si cette continuité des pentes est obtenue initialement, le fluage ultérieur du béton entraine toujours une cassure du profil en long, à la clé.

c) En outre, les articulations sont des pièces délicates, dont la tenue dans le temps pose des problèmes.

C'est en raison de ces inconvénients que les systèmes à articulation de clé ont fini par être abandonnés au profit des systèmes continus. La continuité est réalisé par précontrainte, grâce à des câbles enfilés après bétonnage du voussoir de clé, et tendus après durcissement de celui-ci.

A la lumière de ce que nous venons d'exposer plus haut, nous voyons que les câbles peuvent se regrouper en deux familles :

a) Les câbles de fléaux : mis en oeuvre à la construction, pour assembler les voussoirs successifs, à l'extrémité desquels ils sont ancrés, en général dans les âmes des poutres, parfois dans le hourdis supérieur. Cet ancrage se fait rarement au moyen des bossages car ils compliquent la construction et la manoeuvre des coffrages intérieurs, et la mise en tension.

b) Les câbles de continuité : la plupart sont situés à proximité de la fibre inférieure du caisson et sont alors, soit relevés dans les âmes et ancrés dans des encoches aménagées dans l'extrados de l'ouvrage, soit filants dans le hourdis inférieur et ancrés dans des bossages faisant saillie au dessus de celui-ci. La paroi supérieure du hourdis inférieur n'étant pas coffrée, la construction des bossages ne pose pas de problème.

1.2. - Objet et intérêt de l'étude. -

Les examens faits sur certaines constructions en béton précontraint, ont révélé des fissurations inattendues auprès des bossages d'ancrage des câbles de continuité sur le hourdis inférieur du caisson. L'introduction d'un effort concentré élevé sur un élément en général mince, et d'une façon excentrée à cause du bossage, risque d'entraîner des sollicitations importantes.

Dans un certain nombre d'ouvrages à poutre-caisson, on a constaté des fissures dans le hourdis inférieur qui partent de l'arrière des bossages des ancrages et se développent en avant de ceux-ci, vers les âmes, en suivant une direction inclinée, sensiblement entre 35 et 45° sur l'axe longitudinal du tablier.

Les fissures se propagent parfois jusque dans les âmes. Le phénomène peut être exceptionnellement important (voir fig 1.1), avec des fissures qui atteignent une ouverture de 2 mm et rejoignent, dans certains cas, pratiquement le hourdis supérieur.

Des fois, la fissuration peut se développer en arrière des bossages et atteindre les joints de voussoirs qui se trouvent ainsi décomprimés,

et peuvent s'ouvrir sous les charges et les sollicitations thermiques.

Ces fissures, dues à la diffusion de la précontrainte, se trouvent parfois aggravées par la morphologie des ouvrages : trop grand nombre de câbles ancrés dans le hourdis, dimensions du bossage et du hourdis disproportionnées, ferraillage insuffisant, etc...

On voit donc l'intérêt pratique d'une bonne connaissance du fonctionnement de ce type d'ancrage, ainsi que de l'état de sollicitations dans le hourdis au voisinage du bossage. Le caractère tridimensionnel du problème le rend assez complexe, ce qui explique que peu d'études lui aient été dédiées jusqu'ici.

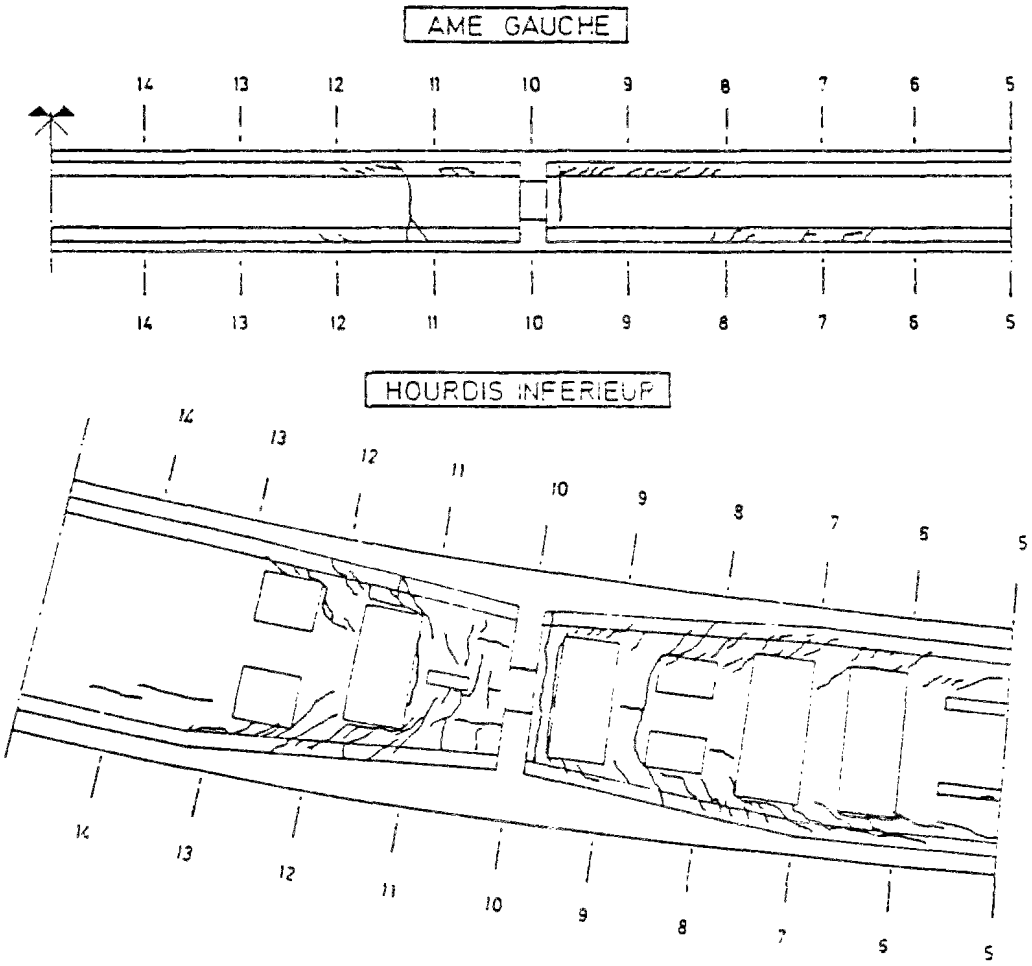


FIG 1.1

1.3. - Position du problème. -

Sur le plan pratique, nous pouvons cerner le problème de résistance de cette partie d'ouvrage en abordant séparément les quatre aspects suivants :

a) La question de la diffusion de la précontrainte dans le bossage. Celui-ci constitue une pièce prismatique en béton sur laquelle est appliquée, moyennant un vérin de mise en tension, et une plaque de répartition, une force concentrée. Ce premier aspect n'est pas très loin du problème de l'ancrage d'un câble à l'about d'une poutre.

b) L'étude du plan de jonction du bossage au hourdis, c'est-à-dire, la recherche de la couture d'attache du bossage au hourdis.

c) L'équilibre de la poussée au vide induite par la courbure du câble dans la zone de raccord avec la fibre moyenne du hourdis.

d) La répartition des contraintes dans le hourdis, notamment la concentration des contraintes et leur localisation (traction d'entraînement derrière le bossage, flexions locales, etc.). Il s'agit de l'étude de la diffusion d'une force de précontrainte qui s'applique au moyen d'un bossage, dans un voile mince qui est partiellement encastré sur les âmes latérales.

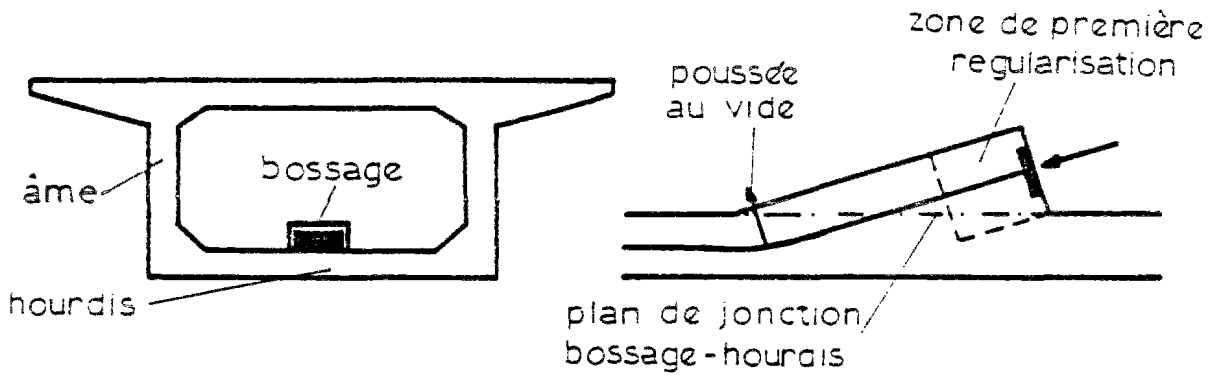


FIG 1.2

1.4. - Revue des études antérieures - Recherche au L.C.P.C. -

—— Alors que les ancrages aux abouts des poutres ont fait l'objet de recherches déjà anciennes, qui ont abouti à des méthodes de dimensionnement satisfaisantes(réf 1 et 2), il n'existe pas encore à l'heure actuelle que très peu de publications concernant les recherches sur les ancrages par bossage.

Le cas de l'ancrage placé à l'intérieur d'un voile de béton (les ancrages passifs noyés) a été étudié théorique et expérimentalement par plusieurs auteurs : W. SCHLEEH (réf 3 et 4), J. EIBL et G. IVANYI (réf 5) et OULITSKI et autres (réf 6).

Ces recherches montrent l'existance de deux zones de contraintes de traction :

a) Une zone de traction d'entraînement derrière l'ancrage, dans laquelle les tractions sont fortes et décroissent rapidement lorsqu'on s'éloigne de l'ancrage,
b) Une zone de traction transversale d'éclatement, devant l'ancrage, avec des contraintes plus faibles, qui se repartissent sur une longueur plus grande.

Les résultats semblent montrer que la fissuration reste acceptable avec un besoin d'armatures relativement réduit.

—— Les études précédentes sont restées dans le domaine bidimensionnel. Elles n'ont pas étudié les ancrages par bossage, où l'application inclinée de la charge, au moyen d'une pièce de grand raideur par rapport au hourdis, entraîne l'apparition des flexions locales qui rendent le problème tridimensionnel.

Cette question a été abordée au S.E.S et dernièrement au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C.). La recherche du L.C.P.C, à la fois sur le plan théorique et expérimental (réf 7,8), était très poussée du point de vue du calcul élastique, et comportait une étude expérimentale d'un ancrage par bossage centré dans une plaque appuyée sur la tranche à un about. La plaque du hourdis (fig 1.3)avait les bords libres. L'influence de l'encastrement du hourdis dans les âmes latérales

du caisson, n'y a pas été prise en compte.

Nous allons dans ce qui suit résumer les points essentiels de l'étude du LCPC par M. LY :

— Son étude portait sur un corps d'épreuve dont les dimensions sont indiquées dans la fig 1.3.

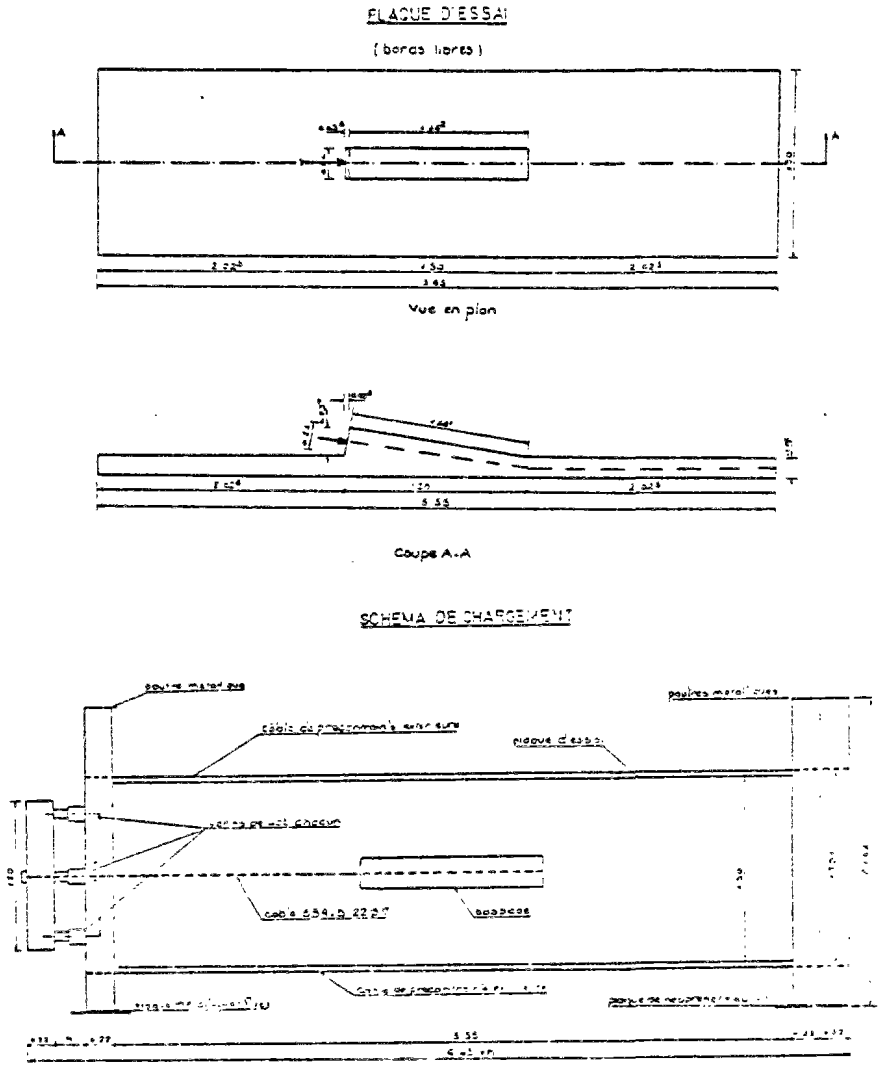


FIG 1.3.

Le travail comporte trois types d'analyse différents.

1. - La première a été une adaptation de la méthode proposée par W. SCHLEEH (réf 3 et 4), pour calculer l'état de contraintes dans une poutre de grande hauteur, à bords libres, munie d'un ancrage interne appliqué dans son plan.

Il s'agit d'une méthode élastique bidimensionnelle, dont la solution est déterminée par l'intermédiaire d'une fonction d'Airy de la forme :

$$\phi(x,y)=\sum\frac{1}{\beta_n^2}(A_n+\beta_n x B_n)\, e^{-\beta_n x}\cos\beta_n y \quad , \text{avec} \quad \beta_n=\frac{(2n-1)\pi}{4b} \quad \text{et}$$

'b' la demi-largeur de la plaque.

Les résultats obtenus avec cette méthode, lui ont permis de dimensionner le hourdis du corps d'épreuve qui a été soumis ensuite aux essais.

Les contraintes obtenues au niveau du plan moyen de la plaque, à partir des essais, étaient beaucoup plus faibles que celles trouvées analytiquement avec cette méthode, le rapport étant d'un tiers. Par contre, si la charge, au lieu d'être appliqué brutalement comme dans le cas d'un ancrage interne, était supposée s'appliquer progressivement par fractions égales tout le long du bossage, les résultats du calcul s'approchaient de ceux des essais. Le bossage, par l'inertie supplémentaire qu'il apporte, joue donc un rôle important de répartition de la force en précontrainte.

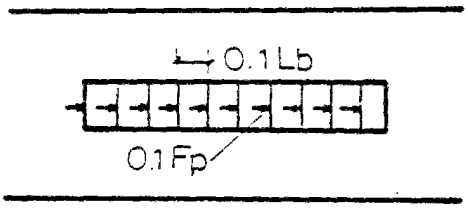


FIG 1.4

2. - La méthode de SCHLEEH ne permet pas de tenir compte de la rigitidé du bossage et des effets de flexion dus à l'excentrement du câble de précontrainte par rapport au centre de gravité de chaque section. LY a mis au point une deuxième méthode qui permet d'obtenir les flexions locales qui apparaissent au voisinage du bossage. Il s'agit de la "méthode des coupures", que nous allons reprendre, et qui sera présentée en détail au chapitre 2.

Cette méthode avait été déjà utilisée par OULITSKI (ref 6) dans le calcul de l'état de contraintes d'une plaque munie d'un ancrage interne. Il décomposait la plaque en bandes finies parallèles à l'axe des 'x' et développait les efforts hyperestatiques libérés N (X) et T (x) en séries de Fourier (fig 1.5) :

$$T(x)=\Sigma\, t_n \cos\lambda_n x \quad ; \quad N(x)=\Sigma\, s_n \sin\lambda_n x \; ; \; \lambda_n=\frac{n\pi}{L}$$

Schéma de partage d'une plaque en bandes.

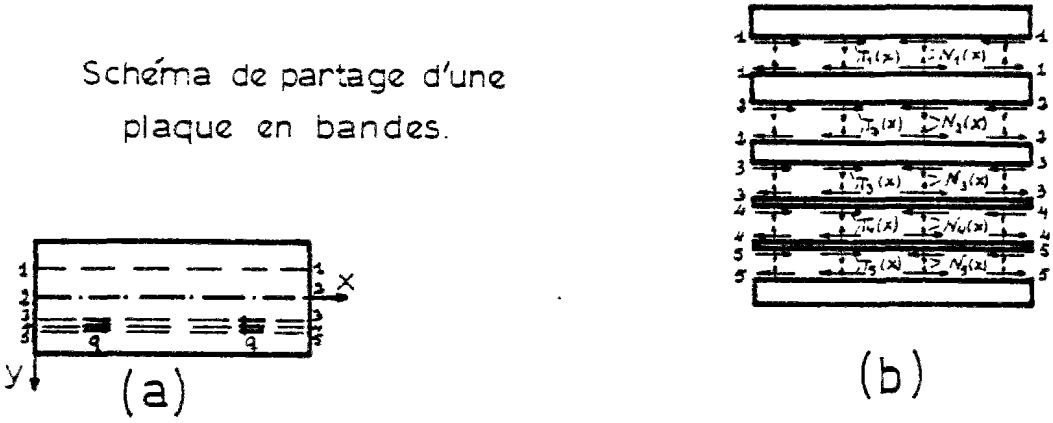


FIG 1.5

Les coefficients t_n et s_n, étaient obtenus par les conditions de compatibilité des déformations aux bords de chaque élément.

LY a pris aussi en compte les efforts de flexion, en approchant la bande longitudinale qui contient le bossage par une poutre à raideur variable.

3. - La méthode des coupures a permis d'obtenir une représentation assez approchée de l'état de sollicitations dans le hourdis, en tenant compte des importantes flexions locales qui y apparaissent.

Cependant, elle ne permettait pas d'avoir une idée sur ce qui se passe ni dans le bossage proprement dit, ni dans le plan de couture bossage-hourdis.

Il lui a donc fallu d'étudier la pièce avec la méthode des éléments finis élastiques, ce qui d'une part a servi de vérification à la méthode des coupures, et d'autre part a fourni les renseignements qui manquaient. Cette étude a été faite avec deux programmes : un premier bidimensionnel qui a étudié un modèle plan obtenu en coupant le bossage suivant le plan 'xoz' (fig 1.6), et l'autre tridimensionnel.

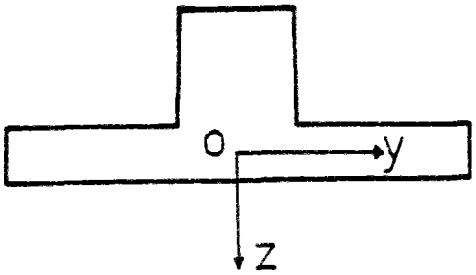


FIG 1.6

Dans la fig 1.7 nous montrons les courbes des contraintes de surface et d'éclatement obtenues par LY. On constate l'existence dans le bossage d'une zone de traction d'éclatement, et sur les onglets bordant la plaque d'ancrage une zone de traction de surface. Le maximum des tractions d'éclatement apparaît à la surface et non dans l'axe du bossage. Dans le tableau 1 nous indiquons les principaux résultats du calcul, ainsi que ceux obtenus d'après l'Instruction provisoire pour le calcul des ouvrages en béton précontraint (réf 2), concernant la zone de première régularisation.

	Tractions d'éclatement Te/F	Tractions d'éclatement σ_{ymax}/Po	Tractions de surface Ts/F
Eléments finis	0.115 (a)	1. (a)	0.048
	0.097 (b)	0.52 (b)	
Instruction provisoire	0.063	0.52 (b)	0.053
Mesure		0.64	

TABLEAU 1

(a) en surface

(b) à l'axe du câble

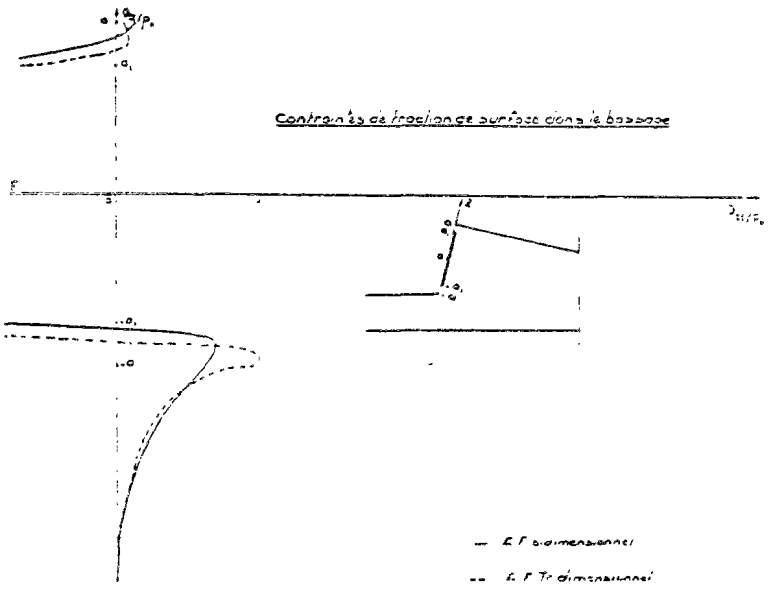


FIG 1.7-a

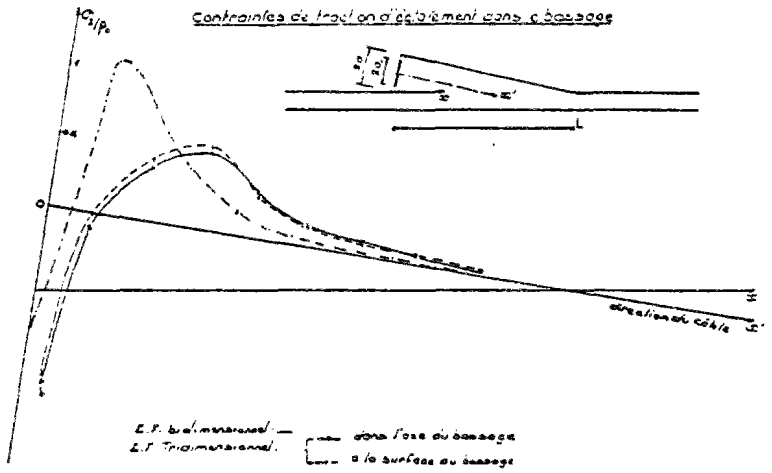


FIG 1.7-b

On constate que l'Instruction Provisoire conduit à une sous-estimation des tractions d'éclatement. En tout cas, puisque le bossage a tenu lors des essais, les auteurs pensent que les directives du règlement sont transposables au cas du bossage moyennant deux adaptations : les armatures destinées à résister les tractions de surface doivent être prolongées jusqu'à la face inférieure de la plaque; les armatures concernant les tractions d'éclatement doivent être légèrement renforcées et disposées en tenant compte que le maximum se trouve en surface du bossage.

En ce qui concerne le plan de jonction bossage-hourdis, les courbes obtenues par LY sont montrées dans la fig 1.8. Ces résultats montrent que la contrainte verticale σ_z au niveau du plan de jonction est nulle sauf près de l'ancrage et dans la zone de courbure du câble (poussée au vide). La résultante des tractions près de l'ancrage vaut 0.040F, ce qui correspond à la valeur de la traction de surface et est très éloignée de la traction qui résulterait d'un schéma de résistance de console courte (0.091F).

L'allure des cisaillements est à peu près constante avec une petite pointe due à l'application brutale de la charge. Il apparaît donc que la transmission (tout au moins en phase élastique) se fait par cisaillement et que les armatures de couture doivent être réparties sur toute la longueur du bossage, en prolongeant toutefois l'armature de surface du bossage jusqu'à la fibre inférieure du hourdis.

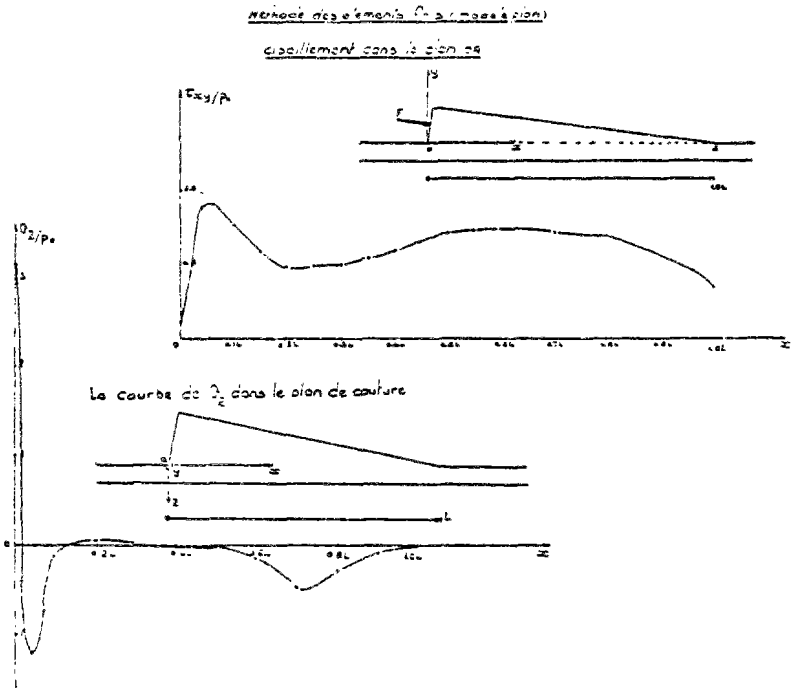


FIG 1.8

1.5. - Plan d'étude. -

— Une étude expérimentale sur le sujet a été entreprise au Service d'Etude des Structures (CEBTP) en 1974, à la demande conjointe du SETRA et de l'UTI (réf 9). Elle portait sur quatre essais, en grandeur réelle, simulant l'ancrage par bossage d'un câble dans un voile en béton, bordé de deux âmes perpendiculaires (section droite en forme de H). Ces essais ont permis d'examiner les différents aspects du problème, déjà cités au paragraphe 1.3.

— Notre étude comporte deux parties : une théorique et une autre expérimentale.

Le travail théorique prend comme point de départ la recherche du LCPC. Ces travaux sont à notre avis, assez complets dans le domaine élastique, mais ils sont susceptibles d'être améliorés sur deux points importants :

a) son analyse portait sur l'étude théorique et expérimentale du comportement d'un voile en béton, muni d'un bossage centré, avec les bords latéraux libres. Néanmoins, en réalité le hourdis est bordé latéralement par les âmes du caisson, qui établissent certaines restrictions aux déplacements des bords de la pièce, ce qui risque d'entrainer des variations importantes dans les valeurs des contraintes au niveau de plan moyen du hourdis, ainsi que des flexions locales qui apparaissent au voisinage du bossage.

b) L'étude est limitée au domaine élastique, sans tenir compte des redistributions importantes qui doivent se produire par suite de la fissuration et du comportement non linéaire du béton en compression.

Bien que ces deux facteurs doivent certainement influencer les distributions des contraintes dans le hourdis, nous considérons que les conclusions tirées alors à propos de la diffusion de la précontrainte à l'intérieur du bossage proprement dit, ainsi que le mécanisme de transmission des efforts dans le plan de jonction hourdis-bossage, ne doivent pas être affectés par ceux-ci, car il s'agit des phénomènes très localisés.

—Nous allons donc nous limiter à l'étude de la sollicitation du hourdis par suite de l'application d'une force de précontrainte au moyen d'un bossage (ou de plusieurs), c'est-à-dire au point d) du paragraphe 1.3.

Notre étude théorique comporte deux parties :

1. - Une analyse élastique, qui va reprendre la méthode des coupures utilisée au LCPC, mais en essayant de mieux approcher les conditions sur les bords qui existent dans la réalité. La méthode mise au point va être utilisée pour étudier l'influence, sur les distributions de contraintes dans le hourdis, de certains paramètres, notamment les dimensions relatives du bossage et l'effet du groupement de plusieurs ancrages.

2. - Une analyse non linéaire, qui va nous permettre d'étudier le comportement de la pièce jusqu'à la rupture. Ce qui exige la mise au point d'un programme aux éléments finis non linéaires qui tient compte de la présence des aciers, de la fissuration du béton et de son comportement non linéaire en compression.

La méthode va être aussi utilisée pour étudier l'effet d'un état général de sollicitations (de compression ou de traction) règnant dans la zone de l'ancrage, sur le phénomène local de diffusion de la précontrainte.

— L'étude expérimentale réalisée est une continuation de la recherche de 1974, notamment dans le cas de plusieurs ancrages relativement groupés dans un hourdis en compression.

CHAPITRE 2

APPLICATION DE LA METHODE DES COUPURES

La méthode des coupures, utilisée par LY KIM TY (réf.7), permet d'étudier d'une façon analytique l'état de contraintes d'une plaque munie d'un bossage. Elle prend en compte la rigidité du bossage, nettement supérieure à celle de la plaque, ainsi que les effets de la flexion due à l'excentrement du câble par rapport au centre de gravité de la dalle, à son inclinaison et à la forme du bossage. Ce dernier est une pièce à inertie variable dont la ligne moyenne est aussi excentrée par rapport au plan moyen de la plaque.

2.1. Principe du calcul et hypothèses principales

Ce calcul, comme l'on a déjà dit dans le premier chapitre, est une adaptation améliorée de la méthode présentée par OULITSKI et VALOUYVA (réf. 6) pour l'étude plane d'une plaque munie d'ancrages noyés.

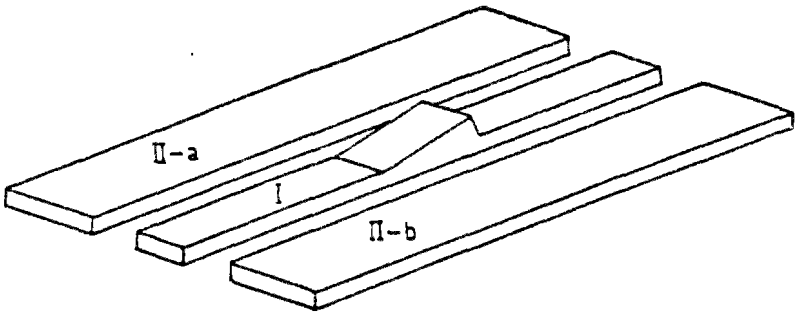


Fig. 2.1

Le principe consiste à découper longitudinalement la plaque en bandes : celle comportant le bossage et celles adjacentes (fig.2.1).

Pour des raisons de calcul, nous avons pris la structure suivante (fig. 2.2) :

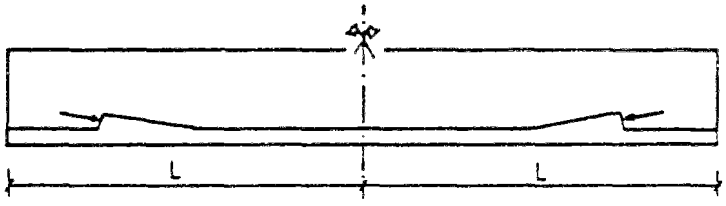


Fig. 2.2

Il suffit de considérer une longueur L suffisamment grande pour que l'on obtienne dans l'axe de symétrie la distribution de contraintes de NAVIER,

et aux extrémités des contraintes nulles.

La structure est donc divisée en trois sous structures. Il faut évidemment, appliquer le long des coupures, les efforts internes libérés (fig.2.3):

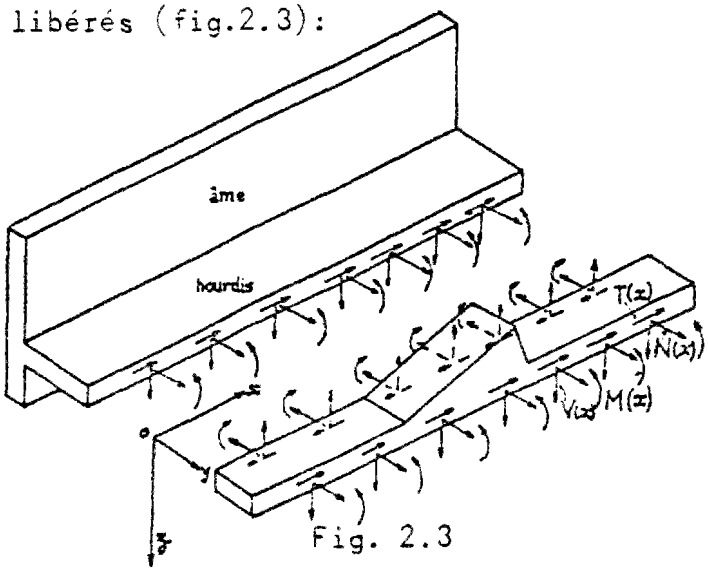


Fig. 2.3

- un effort normal N(x);
- des efforts tangents :

T (x) parallèle à $\overrightarrow{Ox}$ (cisaillement),

V (x) parallèle à $\overrightarrow{Oz}$ (réaction verticale);

- un moment transversal M (x) d'axe $\overrightarrow{Ox}$.

Ces efforts internes sont les inconnues du problème.

On les suppose développés en séries de Fourier sous les formes suivantes :

$$N(x) = \sum_n f_n \cos \alpha_n x$$
$$T(x) = \sum_n t_n \sin \alpha_n x$$
$$V(x) = \sum_n v_n \cos \alpha_n x$$
$$M(x) = \sum_n m_n \cos \alpha_n x$$

avec $\alpha_n = \frac{n\pi}{2L}$, $n = 1, 3, 5 \ldots$

(avec le type de développement choisi, il est facile de vérifier que les termes pairs deviennent nuls).

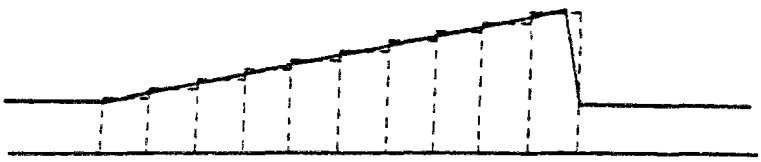
Par symétrie, par rapport à x = O , les fonctions N (x), V (x) et M (x), doivent être choisies paires et la fonction T (x), impaire.

On peut pour la même raison n'étudier que le quart de la structure. Nous avons donc 4 N inconnues par coupure, N étant le nombre de termes de Fourier considérés, (du fait de la petite capacité de l'ordinateur utilisé, nous nous sommes limités à 30, précision qui nous paraît suffisante).

Les coefficients f_n, t_n, v_n et m_n, etant supposes connus, l'état de contraintes dans les différentes sous structures est ainsi obtenu:

- Pour les bandes ne comportant pas de bossage, on peut calculer la solution élastique exacte d'après les méthodes traditionnelles de l'élasticité bidimensionnelle et de la flexion des plaques minces.

- Pour les bandes munies de bossage, on aura une solution approchée en traitant le bossage décomposé en 10 sections de hauteur constante (fig.2.4), afin de pouvoir intégrer numériquement.



Pour certaines sollicitations (flexion, torsion), nous ferons un calcul comme poutre.

Fig. 2.4

Pour les efforts plans, nous utiliserons la formulation correspondante à l'élasticité bidimensionnelle, en introduisant des coefficients correcteurs pour tenir compte de l'accroissement de la rigidité apporté par le bossage (cf. ci-après).

Les équations permettant de résoudre le problème, sont obtenues par égalisation des travaux exécutés par les efforts inconnus le long de deux bords de chaque coupure.

2.2. Améliorations apportées

— Par rapport au calcul du LCPC, nous avons proposé des améliorations sur deux points, de façon à mieux s'approcher des conditions réelles du problème :

1 - Nous avons considéré qu'il était intéressant d'étendre l'étude aux effets entraînés par le groupement de plusieurs bossages.
Le programme mis au point, permet donc d'envisager l'existence de plusieurs ancrages, jusqu'à quatre, à condition de respecter la symétrie par rapport à l'axe médian longitudinal $\overrightarrow{Ox}$ (fig.2.5)

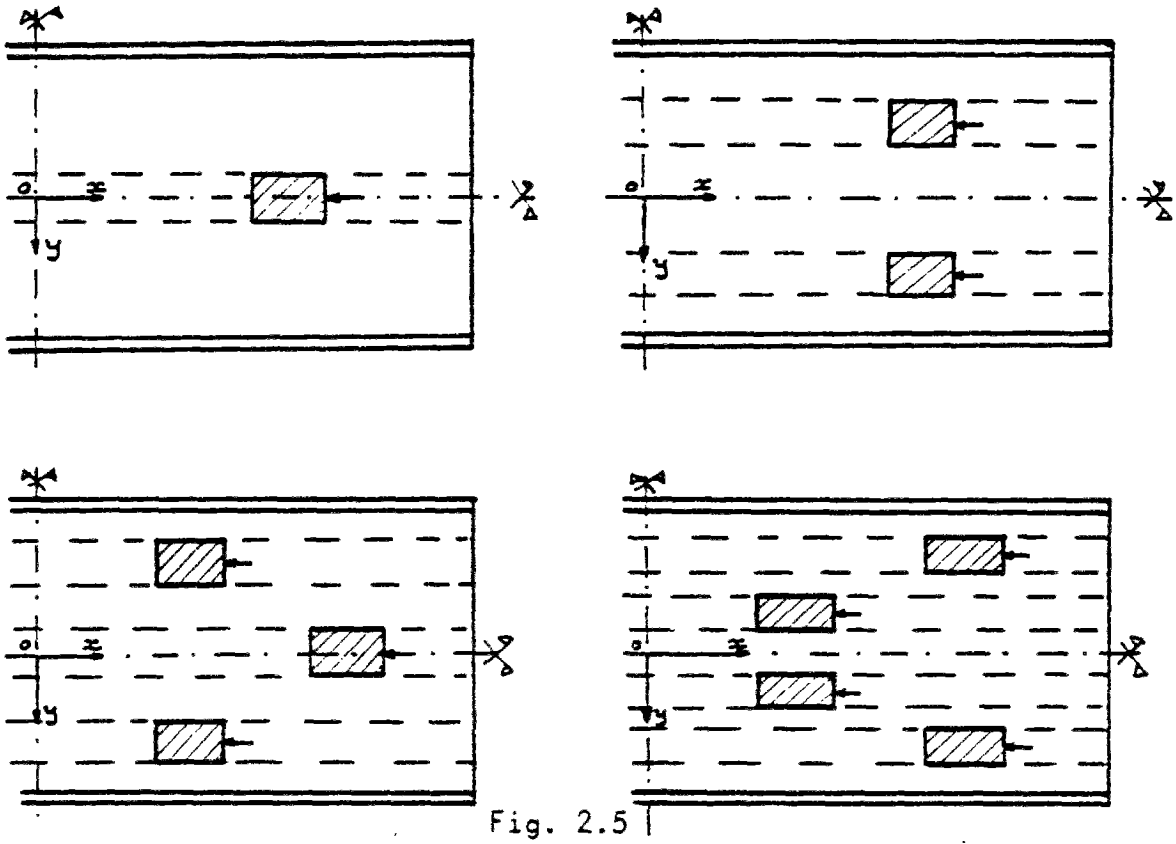


Fig. 2.5

2. LY a abordé le problème d'une plaque à bords libres. Pourtant, la situation réelle est assez différente. Il avait prévu la possibilité d'une modification de la méthode qui permettrait d'établir les conditions d'encastrement parfait aux bords, ce qui fournirait l'autre borne à la situction réelle. Cette façon de procéder est acceptable pour les déplacements tels que : le 'v' (dans le sens transversal $\overrightarrow{Oy}$) la flèche 'w' et la rotation transversale 'φ_y'. Elle ne l'est plus quand il s'agit des déplacements longitudinaux 'u' (dans le sens de l'axe $\overrightarrow{Ox}$). En fait, la situation réelle est un encastrement élastique, vis-à-vis des déplacements 'u', entre le hourdis et les âmes du caisson, de façon que la diffusion longitudinale de la précontrainte, qui commence dans le hourdis, se poursuit dans les âmes, pour aboutir loin du bossage à une distribution des contraintes σ_x de Navier. L'hypothèse d'encastrement parfait oblige des déplacements 'u' nuls tout le long de la jonction hourdis-parois latérales. De cette façon, la force de la précontrainte se transmet entièrement, et très rapidement, aux âmes. C'est-à-dire à l'encastrement. Pas trop loin du bossage, les contraintes σ_x sur le hourdis deviennent nulles, ce qui n'est pas la réalité.

— Nous proposons donc d'établir des conditions de bords plus représentatives de la réalité, de la manière suivante :

- Les flèches $\omega(x)$ sont considérées égales à zéro tout le long de la jonction hourdis-âmes. Cette hypothèse est suffisamment correcte du fait de l'énorme rigidité des âmes dans leur plan, par rapport à celle du hourdis travaillant transversalement à son plan moyen.

- Les rotations transversales $\varphi_y(x)$, sont également considérées comme nulles. Dans ce cas, les flexions transversales obtenues seront plus importantes que dans la réalité. Le hourdis et les âmes ont sensiblement une même rigidité par rapport aux efforts de flexion transversale. Les effets seront de toute façon négligeables si le bossage n'est pas trop près des âmes. La situation réelle peut être supposée comme intermédiaire entre notre calcul et celui de LY.

- Les déplacements transversaux $v(x)$, ne seront pas restreints. La grande rigidité du hourdis dans son plan, par rapport à celle des âmes travaillant transversalement, rend vraisemblable cette hypothèse de bords libres.

- Quant aux déplacements longitudinaux $u(x)$, on va tenir compte de la diffusion des efforts longitudinaux dans les âmes. Il sera donc nécessaire de pratiquer une nouvelle coupure le long de la jonction hourdis-âmes (fig.2.6).

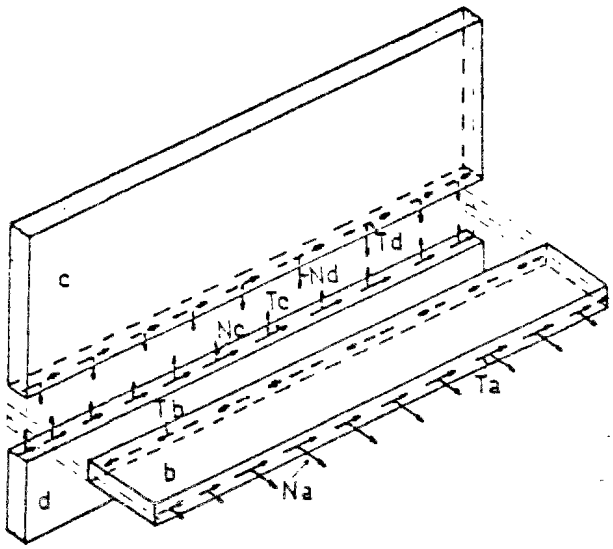


Fig. 2.6

Les deux équations d'équilibre sont :

$$T_b(x) = T_c(x) + T_d(x) \; ;$$

$$N_c(x) = N_d(x) \, ,$$

et les trois de compatibilité des déplacements :

$$u_b(x) = u_c(x) = u_d(x) \; ;$$

$$v_c(x) = v_d(x) \, ,$$

Elles nous permettent de relier les cinq inconnues supplémentaires $T_b(x)$, $T_c(x)$, $T_d(x)$, $N_c(x)$ et $N_d(x)$ aux efforts $T_a(x)$, et $N_a(x)$. Le nombre d'inconnues du problème n'augmente donc pas, tout en permettant de mieux simuler la situation réelle. La formulation complète sera indiquée ultérieurement.

2.3. Résolution de la méthode

2.3.1. Conventions de signes et dimensions

Les efforts N (x), T (x), V (x) et M (x), agissant sur une sous-structure quelconque, sont positifs quand ils ont le sens indiqué à la figure 2.3. Quant aux dimensions, les déplacements sont mesurés en cm, les efforts plans T (x) et N (x) en kg/cm2 (comme des contraintes); et les efforts de flexion V (x) et M (x) en kg/cm et kg.cm/cm, respectivement.

2.3.2. Calcul des différentes sous-structures

Le découpage de la structure en sous-structures, tel qu'il est montré dans la fig. 2.3., ramène le problème à la résolution d'un certain nombre de cas simples.

2.3.2.1. Bandes n'ayant pas de bossage

Nous obtenons la solution séparément pour chaque type de sollicitation.

A - Calcul sous une sollicitation normale (fig. 2.7.)

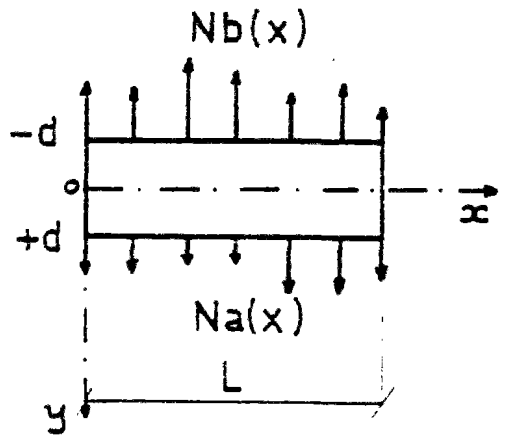


Fig. 2.7

Supposons les efforts développés en séries de Fourier :

$$N_a(x) = \sum_n f_{an} \cos \alpha_n x \quad ;$$

$$N_b(x) = \sum_n f_{bn} \cos \alpha_n x \quad ;$$

$$\alpha_n = \frac{n\pi}{2L} \quad , \quad n = 1, 3, 5 \ldots$$

La solution élastique exacte d'une plaque chargée dans son plan (réf. 10) se ramène à résoudre l'équation :

$$\Delta\Delta \Phi = 0 .$$

Nous allons prendre une fonction d'Airy de la forme :

$\Phi = \sum_n \Phi_n(y) \cos \alpha_n x$, $\Phi_n(y)$ étant de la forme :

$$\Phi_n(y) = I_n \operatorname{ch} \alpha_n y + J_n \operatorname{sh} \alpha_n y + K_n y \operatorname{ch} \alpha_n y + L_n y \operatorname{sh} \alpha_n y .$$

Les expressions des contraintes, prennent la forme :

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} = \sum_n \cos\alpha_n x\,[I_n\alpha_n^2 \operatorname{ch}\alpha_n y + J_n\alpha_n^2 \operatorname{sh}\alpha_n y + K_n\alpha_n(2\operatorname{sh}\alpha_n y + \\
&\qquad + \alpha_n y \operatorname{ch}\alpha_n y) + L_n\alpha_n(2\operatorname{ch}\alpha_n y + \alpha_n y \operatorname{sh}\alpha_n y)] = \sum_n \sigma_{xn}\cos\alpha_n x\ ; \\
\sigma_y &= \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} = \sum_n -\cos\alpha_n x\,[I_n\alpha_n^2 \operatorname{ch}\alpha_n y + J_n\alpha_n^2 \operatorname{sh}\alpha_n y + K_n\alpha_n^2 y \operatorname{ch}\alpha_n y + \\
&\qquad + L_n\alpha_n^2 y \operatorname{sh}\alpha_n y] = \sum_n -\sigma_{yn}\cos\alpha_n x\ ; \\
\tau_{xy} &= -\frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial y} = \sum_n \sin\alpha_n x\,[I_n\alpha_n^2 \operatorname{sh}\alpha_n y + J_n\alpha_n^2 \operatorname{ch}\alpha_n y + K_n\alpha_n(\operatorname{ch}\alpha_n y + \\
&\qquad + \alpha_n y \operatorname{sh}\alpha_n y) + L_n\alpha_n(\operatorname{sh}\alpha_n y + \alpha_n y \operatorname{ch}\alpha_n y)] = \sum_n \tau_{xyn}\sin\alpha_n x\,.
\end{aligned}\right\} \text{(A)}$$

<u>Conditions aux bords</u>

Au bord $y=+d$, on a $\tau_{xy}=0$, et $\sigma_y = \sum_n f_{an}\cos\alpha_n x$;
" " $y=-d$, " " $\tau_{xy}=0$ " " $\sigma_y = \sum_n f_{bn}\cos\alpha_n x$.

CONSERVATOIRE BIBLIOTHÈQUE

En les substituant dans les équations (A) , on obtient :

$$I_n\alpha_n \operatorname{sh}\gamma_n + J_n\alpha_n \operatorname{ch}\gamma_n + K_n[\operatorname{ch}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n] + L_n[\operatorname{sh}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n] = 0 \qquad \text{(a)}\ ;$$

$$-I_n\alpha_n \operatorname{sh}\gamma_n + J_n\alpha_n \operatorname{ch}\gamma_n + K_n[\operatorname{ch}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n] - L_n[\operatorname{sh}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n] = 0 \qquad \text{(b)}\ ;$$

$$I_n \operatorname{ch}\gamma_n + J_n \operatorname{sh}\gamma_n + K_n d \operatorname{ch}\gamma_n + L_n d \operatorname{sh}\gamma_n = -\frac{f_{an}}{\alpha_n^2} \qquad \text{(c)}\ ;$$

$$I_n \operatorname{ch}\gamma_n - J_n \operatorname{sh}\gamma_n - K_n d \operatorname{ch}\gamma_n + L_n d \operatorname{sh}\gamma_n = -\frac{f_{bn}}{\alpha_n^2} \qquad \text{(d)}\ ;$$

avec $\gamma_n = \alpha_n d$

Les deux premières équations donnent :

$$K_n = -J_n \frac{\alpha_n \operatorname{ch}\gamma_n}{\operatorname{ch}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n} \qquad \text{(e)}\ ;$$

$$L_n = -I_n \frac{\alpha_n \operatorname{sh}\gamma_n}{\operatorname{sh}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n} \qquad \text{(f)}\ ;$$

et les deux dernières :

$$K_n = \frac{-\frac{(f_{an}-f_{bn})}{\alpha_n^2} - 2 J_n \operatorname{sh}\gamma_n}{2 d \operatorname{ch}\gamma_n} \qquad (g) \; ;$$

$$L_n = \frac{-\frac{(f_{an}+f_{bn})}{\alpha_n^2} - 2 I_n \operatorname{ch}\gamma_n}{2 d \operatorname{sh}\gamma_n} \qquad (h) .$$

En égalisant (e) et (g), et puis (f) et (h), on obtient:

$$\boxed{\begin{aligned} I_n &= -\frac{(f_{an}+f_{bn})}{\alpha_n^2} \; \frac{\operatorname{sh}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n}{\operatorname{sh}2\gamma_n + 2\gamma_n} \\ J_n &= -\frac{(f_{an}-f_{bn})}{\alpha_n^2} \; \frac{\operatorname{ch}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n}{\operatorname{sh}2\gamma_n - 2\gamma_n} \end{aligned}}$$

et en utilisant (e) et (f), (I)

$$\boxed{\begin{aligned} K_n &= \frac{(f_{an}-f_{bn})}{\alpha_n} \; \frac{\operatorname{ch}\gamma_n}{\operatorname{sh}2\gamma_n - 2\gamma_n} \\ L_n &= \frac{(f_{an}+f_{bn})}{\alpha_n} \; \frac{\operatorname{sh}\gamma_n}{\operatorname{sh}2\gamma_n + 2\gamma_n} \end{aligned}}$$

Les coefficients I_n, J_n, K_n et L_n étant connus, on a complètement défini la distribution des contraintes, et donc des déformations, dans la sous-structure.

Expression des déplacements

D'après la formulation (A), les contraintes ont une expression de la forme :

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \sum_n \sigma_{xn} \cos \alpha_n x \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \sum_n -\sigma_{yn} \cos \alpha_n x \\ \tau_{xy} &= \frac{-\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} = \sum_n \tau_{xyn} \sin \alpha_n x \end{aligned}\right\} \quad \alpha_n = \frac{n\pi}{2L} \; ; n = 1, 3, 5 \ldots$$

où σ_{xn}, σ_{yn}, τ_{xyn} sont seulement fonction de 'y'.

D'après les équations de l'élasticité, on a :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu\sigma_y\right] = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E}\sum_n (\sigma_{xn} + \nu\sigma_{yn})\cos\alpha_n x \;;$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu\sigma_x\right] = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E}\sum_n (\sigma_{yn} + \nu\sigma_{xn})\cos\alpha_n x \;;$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2[1+\nu]}{E}\tau_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{2[1+\nu]}{E}\sum_n \tau_{xyn}\sin\alpha_n x.$$

Le déplacement 'u' est :

$$u(x,y) = u(0,y) + \int_0^x \frac{\partial u}{\partial x}\,dx = u(0,y) + \int_0^x \varepsilon_x\,dx\,.$$

Par symétrie : $u(0,y) = 0$, donc :

$$\underline{u(x,y)} = \frac{1}{E}\int_0^x \sum_n (\sigma_{xn} + \nu\sigma_{yn})\cos\alpha_n x\,dx = \frac{1}{E}\sum_n \frac{1}{\alpha_n}(\sigma_{xn} + \nu\sigma_{yn})\sin\alpha_n x\,. \qquad (a')$$

Quant au déplacement 'v' :

$v(x,y) = v(L,y) + \int_L^x \frac{\partial v}{\partial x}\,dx$. Si l'on prend une longueur 'L' suffisamment grande, les déplacements pour $x = \pm L$ peuvent être négligés, donc :

$$v(x,y) = \int_L^x \left(\frac{2(1+\nu)}{E}\sum_n \tau_{xyn}\sin\alpha_n x - \frac{\partial u}{\partial y}\right)dx = \frac{2(1+\nu)}{E}\sum_n \left(\frac{-\tau_{xyn}}{\alpha_n}\right)\cos\alpha_n x +$$

$$+ \frac{1}{E}\sum_n \frac{\partial}{\partial y}\,\frac{(\sigma_{xn} + \nu\sigma_{yn})}{\alpha_n^2}\cos\alpha_n x\,.$$

L'expression de $\frac{\partial}{\partial y}\,\frac{(\sigma_{xn} + \nu\sigma_{yn})}{\alpha_n^2}$ est obtenue en dérivant (A) :

$$\frac{\partial}{\partial y}\,\frac{(\sigma_{xn} + \nu\sigma_{yn})}{\alpha_n^2} = \Psi_n(y) = (1+\nu)\left[\alpha_n I_n \operatorname{sh}\alpha_n y + \alpha_n J_n \operatorname{ch}\alpha_n y + K_n(\operatorname{ch}\alpha_n y + \alpha_n y \operatorname{sh}\alpha_n y) + \right.$$
$$\left. + L_n(\operatorname{sh}\alpha_n y + \alpha_n y \operatorname{ch}\alpha_n y)\right] + 2\left[K_n \operatorname{ch}\alpha_n y + L_n \operatorname{sh}\alpha_n y\right]. \qquad (b')$$

Par conséquent :

$$\underline{v(x,y)} = \frac{1}{E}\sum_n \left[-2(1+\nu)\frac{\tau_{xyn}}{\alpha_n} + \Psi_n(y)\right]\cos\alpha_n x\,, \qquad (c')$$

où les expressions de σ_{xn} , σ_{yn} et τ_{xyn}, sont données par (A).

a) Déplacements 'u' :

a.1) Bord y = + d :

$$u(x,d)=\frac{1}{E}\sum_n \sin\alpha_n x\,[(\alpha_n I_n(1+\nu)+\gamma_n K_n(1+\nu)+2L_n)\,ch\gamma_n+(\alpha_n J_n(1+\nu)+$$

$$+L_n\gamma_n(1+\nu)+2K_n)\,sh\gamma_n]=\frac{1}{E}\sum_n \sin\alpha_n x\,[2(L_n ch\gamma_n+K_n sh\gamma_n)+$$

$$+(1+\nu)(\alpha_n I_n ch\gamma_n+\alpha_n J_n sh\gamma_n+\gamma_n L_n sh\gamma_n+\gamma_n K_n ch\gamma_n)] \qquad (d')$$

Avec $\boxed{\gamma_n=\alpha_n d}$

Mais d'après (I) :

$$\alpha_n I_n ch\gamma_n+\gamma_n L_n sh\gamma_n=-\frac{(f_{an}+f_{bn})}{2\alpha_n}\ ;$$

$$\alpha_n J_n sh\gamma_n+\gamma_n K_n ch\gamma_n=-\frac{(f_{an}-f_{bn})}{2\alpha_n}\ .$$

Si l'on substitue en (d'), on arrive à :

(II-a)

$$u_N(x,d)=\frac{1}{E}\sum_n\left[\frac{A(d)}{\alpha_n}f_{an}+\frac{B(d)}{\alpha_n}f_{bn}\right]\sin\alpha_n x\ ,$$

avec, $A(d)=2[\hat{L}_n ch\gamma_n+\hat{K}_n sh\gamma_n]-(1+\nu)$;

$B(d)=2[\hat{L}_n ch\gamma_n-\hat{K}_n sh\gamma_n]$;

et $\hat{L}_n=\frac{sh\gamma_n}{sh2\gamma_n+2\gamma_n}$, $\hat{K}_n=\frac{ch\gamma_n}{sh2\gamma_n-2\gamma_n}$.

a.2) Bord y = - d :

$$u(x,-d)=\frac{1}{E}\sum_n \sin\alpha_n x\,[2(L_n ch\gamma_n-K_n sh\gamma_n)+(1+\nu)(\alpha_n I_n ch\gamma_n+$$

$$+\gamma_n L_n sh\gamma_n-\alpha_n J_n sh\gamma_n-\gamma_n K_n ch\gamma_n)]\ ,$$

et en agissant de même qu'auparavant:

(II-b)

$$u_N(x,-d)=\frac{1}{E}\sum_n\left[\frac{B(d)}{\alpha_n}f_{an}+\frac{A(d)}{\alpha_n}f_{bn}\right]\sin\alpha_n x$$

b) Déplacements 'v' :

b.1) Bord $y = +d$:

Le long des bords, τ_{xy} est nul, donc $\tau_{xyn} \equiv 0$.

$$v(x,d) = \frac{1}{E}\sum_n \Psi_n(d)\cos\alpha_n x = \frac{1}{E}\sum_n \Big[(1+\nu)(\alpha_n I_n \operatorname{sh}\gamma_n + \alpha_n J_n \operatorname{ch}\gamma_n + K_n(\operatorname{ch}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n] + L_n(\operatorname{sh}\gamma_n + \gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n)) + 2(K_n \operatorname{ch}\gamma_n + L_n \operatorname{sh}\gamma_n)\Big]\cos\alpha_n x . \qquad (e')$$

D'après (I) :

$$\alpha_n I_n \operatorname{sh}\gamma_n + \gamma_n L_n \operatorname{ch}\gamma_n + L_n \operatorname{sh}\gamma_n = 0 ,$$

$$\alpha_n J_n \operatorname{ch}\gamma_n + \gamma_n K_n \operatorname{sh}\gamma_n + K_n \operatorname{ch}\gamma_n = 0$$

Si l'on substitue dans (e') :

$$v(x,d) = \frac{1}{E}\sum_n 2\left[K_n \operatorname{ch}\gamma_n + L_n \operatorname{sh}\gamma_n\right]\cos\alpha_n x .$$

$$\boxed{\begin{array}{l} v_N(x,d) = \dfrac{1}{E}\displaystyle\sum_n \left[\frac{C(d)}{\alpha_n} f_{an} + \frac{D(d)}{\alpha_n} f_{bn}\right]\cos\alpha_n x , \\ \text{avec,} \\ \qquad C(d) = 2\left[\hat{K}_n \operatorname{ch}\gamma_n + \hat{L}_n \operatorname{sh}\gamma_n\right] ; \\ \qquad D(d) = 2\left[\hat{L}_n \operatorname{sh}\gamma_n - \hat{K}_n \operatorname{ch}\gamma_n\right] , \\ \text{où} \qquad \hat{L}_n \text{ et } \hat{K}_n \text{ sont les mêmes qu'en (II)} \end{array}} \qquad \text{(III-a)}$$

b.2) Bord $y = -d$:

De la même façon qu 'auparavant :

$$\boxed{v_N(x,-d) = -\frac{1}{E}\sum_n \left[\frac{D(d)}{\alpha_n} f_{an} + \frac{C(d)}{\alpha_n} f_{bn}\right]\cos\alpha_n x} \qquad \text{(III-b)}$$

B - Calcul sous une sollicitation tangente (fig. 2.8)

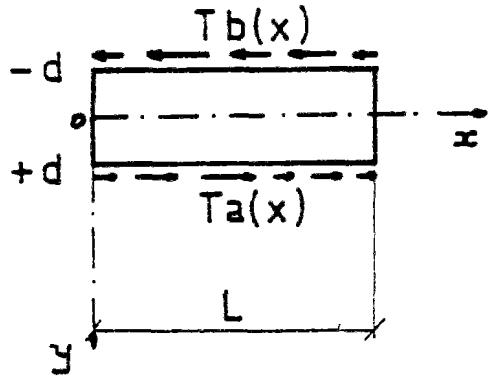


Fig. 2.8

Supposons les efforts développés en sériers de Fourier :

$$Ta(x) = \sum_n t_{an} \sin \alpha_n x \; ;$$

$$Tb(x) = \sum_n t_{bn} \sin \alpha_n x \; .$$

On a les conditions aux bords suivantes :

Au bord $y = +d$, on a $\sigma_y = 0$, et $\tau_{xy} = \sum_n t_{an} \sin \alpha_n x$;

" " $y = -d$, on a $\sigma_y = 0$, et $\tau_{xy} = \sum_n t_{bn} \sin \alpha_n x$.

Et par une démarche analogue à celle suivie lors du calcul précédent, nous obtenons les expressions :

$$\boxed{\begin{aligned} I_n &= -\frac{(t_{an} - t_{bn})}{\alpha_n^2} \; \frac{\gamma_n \, sh\, \gamma_n}{sh\, 2\gamma_n + 2\gamma_n} \; ; \\ J_n &= -\frac{(t_{an} + t_{bn})}{\alpha_n^2} \; \frac{\gamma_n \, ch\, \gamma_n}{sh\, 2\gamma_n - 2\gamma_n} \; ; \\ K_n &= \frac{(t_{an} + t_{bn})}{\alpha_n} \; \frac{sh\, \gamma_n}{sh\, 2\gamma_n - 2\gamma_n} \; ; \\ L_n &= \frac{(t_{an} - t_{bn})}{\alpha_n} \; \frac{ch\, \gamma_n}{sh\, 2\gamma_n + 2\gamma_n} \; . \end{aligned}} \qquad (IV)$$

$$u_T(x,d) = \frac{1}{E}\sum_n \left(\frac{E(d)}{\alpha_n} t_{an} + \frac{F(d)}{\alpha_n} t_{bn} \right) \sin \alpha_n x \ ;$$

avec, $E(d) = 2[\hat{K}_n \operatorname{sh}\gamma_n + \hat{L}_n \operatorname{ch}\gamma_n]$;

$F(d) = 2[\hat{K}_n \operatorname{sh}\gamma_n - \hat{L}_n \operatorname{ch}\gamma_n]$; (V)

$$\hat{K}_n = \frac{\operatorname{sh}\gamma_n}{\operatorname{sh}2\gamma_n - 2\gamma_n} \quad ; \quad \hat{L}_n = \frac{\operatorname{ch}\gamma_n}{\operatorname{sh}2\gamma_n + 2\gamma_n} \ .$$

$$u_T(x,-d) = -\frac{1}{E}\sum_n \left(\frac{F(d)}{\alpha_n} t_{an} + \frac{E(d)}{\alpha_n} t_{bn} \right) \sin \alpha_n x \ .$$

$$v_T(x,d) = \frac{1}{E}\sum_n \left(\frac{G(d)}{\alpha_n} t_{an} + \frac{H(d)}{\alpha_n} t_{bn} \right) \cos \alpha_n x ;$$

avec, $G(d) = 2[\hat{K}_n \operatorname{ch}\gamma_n + \hat{L}_n \operatorname{sh}\gamma_n] - (1+\nu)$;

$H(d) = 2[\hat{K}_n \operatorname{ch}\gamma_n - \hat{L}_n \operatorname{sh}\gamma_n]$; (VI)

K_n et L_n sont les mêmes qu'en (V) .

$$v_T(x,-d) = \frac{1}{E}\sum_n \left(\frac{H(d)}{\alpha_n} t_{an} + \frac{G(d)}{\alpha_n} t_{bn} \right) \cos \alpha_n x \ .$$

C - Calcul sous une sollicitation de flexion

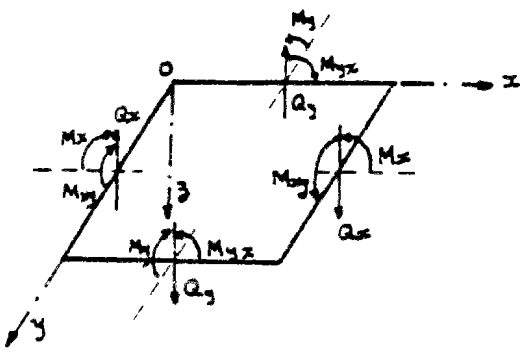


Fig. 2.9

On utilisera la solution élastique de la flexion des plaques minces (réf. 11). L'équation résolvant le problème est:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} = 0$$

Les efforts (fig.2.9) prennent la forme :

$$M_x = -D\left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right] \quad ;$$

$$M_y = -D\left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right] \quad ;$$

$$M_{xy} = -M_{yx} = D[1-\nu]\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \quad ;$$

$$Q_x = \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial M_x}{\partial x} = -D\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right] \quad ;$$

$$Q_y = \frac{\partial M_y}{\partial y} - \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = -D\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right] \quad ;$$

avec :

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} .$$

Les efforts verticaux Q_x, Q_y et les moments de torsion M_{xy}, M_{yx} le long des bords, peuvent être assimilés à un seul effort vertical équivalent :

$$V_x = \left[Q_x - \frac{\partial M_{xy}}{\partial y}\right] = -D\left[\frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} + (2-\nu)\frac{\partial^3 \omega}{\partial x \partial y^2}\right] \quad ;$$

$$V_y = \left[Q_y + \frac{\partial M_{yx}}{\partial x}\right] = -D\left[\frac{\partial^3 \omega}{\partial y^3} + (2-\nu)\frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial y}\right] .$$

Nous allons utiliser la solution proposée par Lévy :

$$\omega = \sum_n \omega_n(y) \cos \alpha_n x \quad \left(\alpha_n = \frac{n\pi}{2L} \; ; \; n = 1, 3, 5 \ldots\right)$$

$\omega_n(y)$ étant :

$$\omega_n(y) = I_n \operatorname{ch} \alpha_n y + J_n \operatorname{sh} \alpha_n y + K_n y \operatorname{ch} \alpha_n y + L_n y \operatorname{sh} \alpha_n y$$

Les expressions générales des efforts prennent donc la forme :

$$
\left.
\begin{aligned}
M_x &= D\sum_n \alpha_n^2\Big[(1-\nu)\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y\, I_n + (1-\nu)\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y\, J_n + \Big[(1-\nu)\, y\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y - \\
&\quad - \frac{2\nu}{\alpha_n}\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y\Big] K_n + \Big[(1-\nu)\, y\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y - \frac{2\nu}{\alpha_n}\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y\Big] L_n\Big]\cos\alpha_n x \quad ; \\
M_y &= -D\sum_n \alpha_n^2\Big[(1-\nu)\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y\, I_n + (1-\nu)\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y\, J_n + \Big[(1-\nu)\, y\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y + \\
&\quad + \frac{2}{\alpha_n}\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y\Big] K_n + \Big[(1-\nu)\, y\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y + \frac{2}{\alpha_n}\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y\Big] L_n\Big]\cos\alpha_n x \quad ; \\
M_{xy} &= -M_{yx} = -D(1-\nu)\sum_n \alpha_n^2\Big[\mathrm{sh}\,\alpha_n y\, I_n + \mathrm{ch}\,\alpha_n y\, J_n + \Big[y\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y + \\
&\quad + \frac{\mathrm{ch}\,\alpha_n y}{\alpha_n}\Big] K_n + \Big[y\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y + \frac{\mathrm{sh}\,\alpha_n y}{\alpha_n}\Big] L_n\Big]\sin\alpha_n x \quad ; \\
V_x &= D\sum_n \alpha_n^3\Big[(1-\nu)\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y\, I_n + (1-\nu)\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y\, J_n + \Big[(1-\nu)\, y\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y + \\
&\quad + \frac{2(2-\nu)}{\alpha_n}\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y\Big] K_n + \Big[(1-\nu)\, y\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y + \frac{2(2-\nu)}{\alpha_n}\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y\Big] L_n\Big]\sin\alpha_n x \quad ; \\
V_y &= D\sum_n \alpha_n^3\Big[(1-\nu)\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y\, I_n + (1-\nu)\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y\, J_n + \Big[(1-\nu)\, y\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y - \\
&\quad - \frac{(1+\nu)}{\alpha_n}\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y\Big] K_n + \Big[(1-\nu)\, y\,\mathrm{ch}\,\alpha_n y - \frac{(1+\nu)}{\alpha_n}\,\mathrm{sh}\,\alpha_n y\Big] L_n\Big]\cos\alpha_n x \quad .
\end{aligned}
\right\} \text{B}
$$

<u>Conditions aux bords (fig. 2.10)</u>

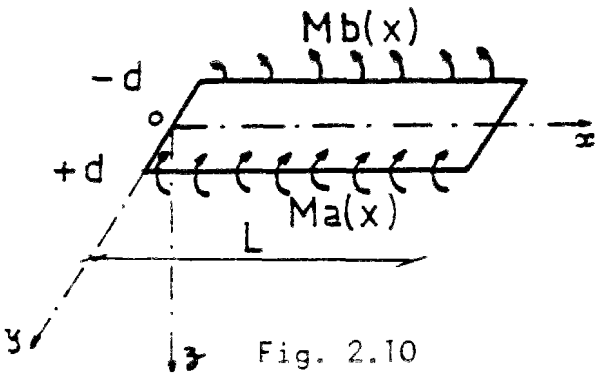


Fig. 2.10

Supposons les moments fléchissants développés en séries de Fourier :

$$M_a(x) = \sum_n m_{an}\cos\alpha_n x \;;$$

$$M_b(x) = \sum_n m_{bn}\cos\alpha_n x \,.$$

Au bord $y = +d$, on a : $V_y = 0$ et $M_y = \sum_n m_{an} \cos \alpha_n x$;

Au bord $y = -d$, on a : $V_y = 0$ et $M_y = \sum_n m_{bn} \cos \alpha_n x$.

En les substituant dans les équations Ⓑ on arrive à :

$$K_n = \frac{-\alpha_n (1-\nu) \operatorname{ch} \gamma_n}{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n - (1+\nu) \operatorname{ch}\gamma_n} J_n \quad ; \quad (a)$$

$$L_n = \frac{-\alpha_n (1-\nu) \operatorname{sh} \gamma_n}{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n - (1+\nu) \operatorname{sh}\gamma_n} I_n \quad ; \quad (b)$$

$$K_n = \frac{-\frac{(m_{an}-m_{bn})}{2D\alpha_n} - \alpha_n (1-\nu) \operatorname{sh}\gamma_n J_n}{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n + 2 \operatorname{sh}\gamma_n} \quad ; \quad (c)$$

$$L_n = \frac{-\frac{(m_{an}+m_{bn})}{2D\alpha_n} - \alpha_n (1-\nu) \operatorname{ch}\gamma_n I_n}{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n + 2 \operatorname{ch}\gamma_n} \quad . \quad (d)$$

En égalisant (a) et (c), et puis (b) et (d), on obtient :

$$I_n = \frac{(m_{an}+m_{bn})}{2D(1-\nu)\alpha_n^2} \; \frac{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n - (1+\nu)\operatorname{sh}\gamma_n}{\beta_n} \; ;$$

$$J_n = \frac{(m_{an}-m_{bn})}{2D(1-\nu)\alpha_n^2} \; \frac{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n - (1+\nu)\operatorname{ch}\gamma_n}{\delta_n} \; ;$$

avec , $\beta_n = \frac{(3+\nu)}{2} \operatorname{sh} 2\gamma_n - (1-\nu)\gamma_n$;

$\delta_n = \frac{(3+\nu)}{2} \operatorname{sh} 2\gamma_n + (1-\nu)\gamma_n$.

et en utilisant (a) et (b), (VII)

$$K_n = -\frac{(m_{an}-m_{bn})}{2D(1-\nu)\alpha_n^2} \; \frac{\alpha_n (1-\nu)\operatorname{ch}\gamma_n}{\delta_n} \; ;$$

$$L_n = -\frac{(m_{an}+m_{bn})}{2D(1-\nu)\alpha_n^2} \; \frac{\alpha_n (1-\nu)\operatorname{sh}\gamma_n}{\beta_n} \; .$$

Une fois que les coefficients I_n, J_n, K_n et L_n sont connus, il est possible d'obtenir les efforts, et par conséquent les déformations dans tous les points de la sous-structure.

Expression des déplacements.-

Les flèches sont :

$$\omega(x,y)=\sum_n [I_n \operatorname{ch}\alpha_n y+J_n \operatorname{sh}\alpha_n y+K_n y \operatorname{ch}\alpha_n y+L_n y \operatorname{sh}\alpha_n y]\cos\alpha_n x. \qquad (a')$$

Les rotations transversales sont obtenues par dérivation :

$$\varphi_y(x,y)=\frac{\partial\omega(x,y)}{\partial y}=\sum_n [\alpha_n I_n \operatorname{sh}\alpha_n y+\alpha_n J_n \operatorname{ch}\alpha_n y+K_n[\operatorname{ch}\alpha_n y+$$

$$+y\alpha_n \operatorname{sh}\alpha_n y]+L_n[\operatorname{sh}\alpha_n y+y\alpha_n \operatorname{ch}\alpha_n y]]\cos\alpha_n x. \qquad (b')$$

En faisant $y = \pm d$ dans les expressions (a') et (b'), nous arrivons aux expressions suivantes :

$$\omega_M(x,d)=\frac{1}{2D(1-\nu)}\sum_n\left[\frac{M(d)}{\alpha_n^2}m_{an}+\frac{N(d)}{\alpha_n^2}m_{bn}\right]\cos\alpha_n x,$$

avec,

$$M(d)=\hat{I}_n \operatorname{ch}\gamma_n+\hat{J}_n \operatorname{sh}\gamma_n+\hat{K}_n\gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n+\hat{L}_n\gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n\ ;$$

$$N(d)=\hat{I}_n \operatorname{ch}\gamma_n-\hat{J}_n \operatorname{sh}\gamma_n-\hat{K}_n\gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n+\hat{L}_n\gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n\ ;$$

$$\hat{I}_n=\frac{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n-(1+\nu)\operatorname{sh}\gamma_n}{\beta_n}\ ;$$

$$\hat{J}_n=\frac{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n-(1+\nu)\operatorname{ch}\gamma_n}{\delta_n}\ ; \qquad \text{(VIII)}$$

$$\hat{K}_n=-\frac{(1-\nu)\operatorname{ch}\gamma_n}{\delta_n}\ ;$$

$$\hat{L}_n=-\frac{(1-\nu)\operatorname{sh}\gamma_n}{\beta_n}\ ;$$

β_n et δ_n sont donnés par (VII).

$$\omega_M(x,-d)=\frac{1}{2D(1-\nu)}\sum_n\left[\frac{N(d)}{\alpha_n^2}m_{an}+\frac{M(d)}{\alpha_n^2}m_{bn}\right]\cos\alpha_n x.$$

$$\varphi_{yM}(x,d) = \frac{1}{D(1-\nu)^2} \sum_n \left[\frac{O(d)}{\alpha_n} m_{an} + \frac{P(d)}{\alpha_n} m_{bn} \right] \cos \alpha_n x ;$$

$$\varphi_{yM}(x,-d) = \frac{-1}{D(1-\nu)^2} \sum_n \left[\frac{P(d)}{\alpha_n} m_{an} + \frac{O(d)}{\alpha_n} m_{bn} \right] \cos \alpha_n x ,$$

avec,

$$O(d) = \hat{L}_n \operatorname{sh} \gamma_n + \hat{K}_n \operatorname{ch} \gamma_n ;$$

$$P(d) = \hat{L}_n \operatorname{sh} \gamma_n - \hat{K}_n \operatorname{ch} \gamma_n ;$$

$\hat{L}_n$ et $\hat{K}_n$ sont les mêmes qu'en (VIII). (IX)

D - Calcul sous une sollicitation verticale (fig. 2.11)

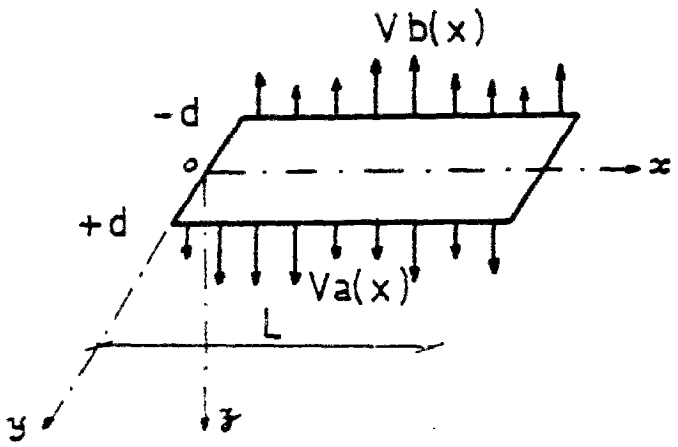


Fig. 2.11

Les efforts ont la forme suivante :

$$V_a(x) = \sum_n v_{an} \cos \alpha_n x ;$$

$$V_b(x) = \sum_n v_{bn} \cos \alpha_n x .$$

On a les conditions aux bords suivantes :

Au bord $y = +d$, on a $M_y = 0$, et $V_y = \sum_n v_{an} \cos \alpha_n x$;

" " $y = -d$, on a $M_y = 0$, et $V_y = \sum_n v_{bn} \cos \alpha_n x$.

En effectuant le même calcul que précédemment, nous obtenons les expressions :

$$I_n = \frac{(v_{an} - v_{bn})}{2D(1-\nu)\alpha_n^3} \; \frac{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{sh}\gamma_n + 2\operatorname{ch}\gamma_n}{\beta_n} \; ;$$

$$J_n = \frac{(v_{an} + v_{bn})}{2D(1-\nu)\alpha_n^3} \; \frac{(1-\nu)\gamma_n \operatorname{ch}\gamma_n + 2\operatorname{sh}\gamma_n}{\delta_n} \; ;$$

$$K_n = -\frac{(v_{an} + v_{bn})}{2D(1-\nu)\alpha_n^3} \; \frac{\alpha_n (1-\nu)\operatorname{sh}\gamma_n}{\delta_n} \; ; \qquad (X)$$

$$L_n = -\frac{(v_{an} - v_{bn})}{2D(1-\nu)\alpha_n^3} \; \frac{\alpha_n (1-\nu)\operatorname{ch}\gamma_n}{\beta_n} \, ,$$

où β_n et δ_n sont données par (VII).

$$\omega_v(x,d) = \frac{-1}{D(1-\nu)^2} \sum_n \left[\frac{Q(d)}{\alpha_n^3} v_{an} + \frac{R(d)}{\alpha_n^3} v_{bn} \right] \cos \alpha_n x \, ;$$

$$\omega_v(x,-d) = \frac{1}{D(1-\nu)^2} \sum_n \left[\frac{R(d)}{\alpha_n^3} v_{an} + \frac{Q(d)}{\alpha_n^3} v_{bn} \right] \cos \alpha_n x \, , \qquad (XI)$$

avec, $Q(d) = \hat{L}_n \operatorname{ch}\gamma_n + \hat{K}_n \operatorname{sh}\gamma_n$;

$R(d) = -\hat{L}_n \operatorname{ch}\gamma_n + \hat{K}_n \operatorname{sh}\gamma_n$,

$\hat{L}_n$ et $\hat{K}_n$ sont les mêmes qu'en (XII).

$$\varphi_{yv}(x,d)=\frac{1}{2D(1-\nu)}\sum_n\left[\frac{S(d)}{\alpha_n^2}v_{an}+\frac{T(d)}{\alpha_n^3}v_{bn}\right]\cos\alpha_n x\,;$$

$$\varphi_{yv}(x,-d)=\frac{1}{2D(1-\nu)}\sum_n\left[\frac{T(d)}{\alpha_n^2}v_{an}+\frac{S(d)}{\alpha_n^3}v_{bn}\right]\cos\alpha_n x\,,$$

avec, $S(d)=\hat{I}_n\,\mathrm{sh}\,\gamma_n+\hat{J}_n\,\mathrm{ch}\,\gamma_n+\hat{K}_n[\mathrm{ch}\,\gamma_n+\gamma_n\,\mathrm{sh}\,\gamma_n]+\hat{L}_n[\mathrm{sh}\,\gamma_n+\gamma_n\,\mathrm{ch}\,\gamma_n]\,;$

$T(d)=-\hat{I}_n\,\mathrm{sh}\,\gamma_n+\hat{J}_n\,\mathrm{ch}\,\gamma_n+\hat{K}_n[\mathrm{ch}\,\gamma_n+\gamma_n\,\mathrm{sh}\,\gamma_n]-\hat{L}_n[\mathrm{sh}\,\gamma_n+\gamma_n\,\mathrm{ch}\,\gamma_n]\,,$

et,

$$\hat{I}_n=\frac{(1-\nu)\,\gamma_n\,\mathrm{sh}\,\gamma_n+2\,\mathrm{ch}\,\gamma_n}{\beta_n}\,;$$

$$\hat{J}_n=\frac{(1-\nu)\,\gamma_n\,\mathrm{ch}\,\gamma_n+2\,\mathrm{sh}\,\gamma_n}{\delta_n}\,;$$

$$\hat{K}_n=-\frac{(1-\nu)\,\mathrm{sh}\,\gamma_n}{\delta_n}\,;$$

$$\hat{L}_n=-\frac{(1-\nu)\,\mathrm{ch}\,\gamma_n}{\beta_n}\,,$$

où β_n et δ_n sont celles de (VII).

(XII)

2.3.2.2. <u>Bandes comportant un bossage</u> (fig.2.12)

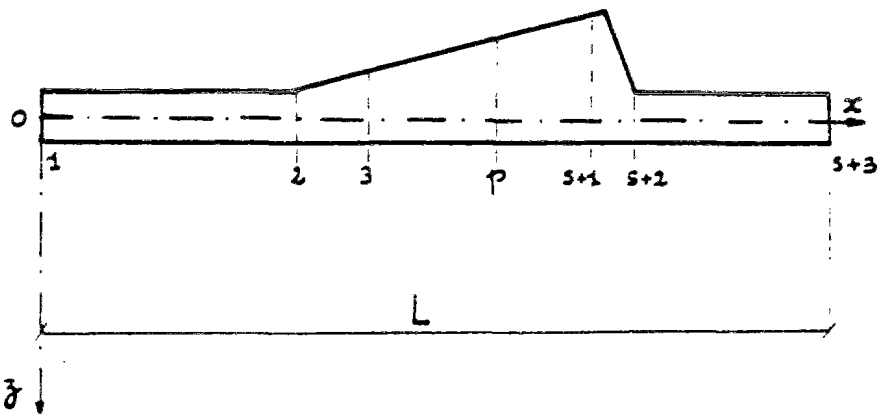


Fig. 2.12

s = nombre de subdivisions du bossage

Pour les bandes munies d'un bossage, on ne peut pas établir une solution analytique exacte. Il faudra donc faire des hypothèses approximatives, lesquelles vont dépendre du type de déplacement et du type d'effort.

Les déplacements totaux seront obtenus par addition des déplacements élémentaires dus à des chacun des efforts sur les coupures, plus ceux dus à la précontrainte :

$$u = u_N + u_T + \cancel{u_M} + u_V + u_{PR.} \quad ;$$

$$v = v_N + v_T + \cancel{v_M} + \cancel{v_V} + v_{PR.} \quad ;$$

$$\omega = \cancel{\omega_N} + \omega_T + \omega_M + \omega_V + \omega_{PR.} \quad ;$$

$$\varphi_y = \cancel{\varphi_{yN}} + \cancel{\varphi_{yT}} + \varphi_{yM} + \varphi_{yV} + \cancel{\varphi_{yPR.}} \quad .$$

La présence du bossage fait qu'aucune des composantes n'est nulle, mais nous pouvons néanmoins négliger les suivantes :

ω_N, φ_{yN}, φ_{yT}, u_M, v_M, v_V et $\varphi_{yPR.}$

2.3.2.2.1. <u>Hypothèses approximatives</u>

a) Les fonctions u_V , ω_T et $\omega_{PR.}$, sont obtenues en supposant que la bande se comporte comme une poutre en flexion.

b) Les fonctions u_N, u_T , v_N et v_T sont obtenues par la même méthode que pour les bandes n'ayant pas de bossage . L'influence de la rigidité variable du bossage est introduite d'une façon approchée.

Les expressions (II), (III), (V) et (VI), montrent que les déplacements 'u', 'v' d'une bande à épaisseur constante prennent une forme telle que celle qui suit :

$$u(x) = \frac{1}{E} \sum_n \theta_n \sin \alpha_n x \qquad \text{et} \qquad v(x) = \frac{1}{E} \sum_n \theta_n \cos \alpha_n x .$$

Pour une bande à épaisseur variable, nous supposons que les déplacements pour une valeur $x, (x_p < x < x_{p+1})$, ont pour expression :

$$- \; u(x) = u(x_p) + \frac{K_p}{E} \sum_n \theta_n (\sin \alpha_n x - \sin \alpha_n x_p) ,$$

avec

$$u(x_p) = \sum_{r=1}^{r=p-1} \frac{K_r}{E} \sum_n \theta_n (\sin \alpha_n x_{r+1} - \sin \alpha_n x_r) .$$

$$- \; v(x) = v(x_{p+1}) + \frac{K_p}{E} \sum_n \theta_n (\cos \alpha_n x - \cos \alpha_n x_{p+1}) ;$$

avec, $$v(x_{p+1}) = \sum_{r=p+1}^{r=s+2} \frac{K_r}{E} \sum_n \theta_n (\cos \alpha_n x_r - \cos \alpha_n x_{r+1}) .$$

En séparant les termes constants de ceux qui sont fonction de 'x' et en simplifiant, nous arrivons à des expressions du type :

Pour $x_p < x < x_{p+1}$:

$$u(x) = \frac{1}{E} \sum_n \theta_n [u_{00} + u_{01} \sin \alpha_n x],$$

avec,

$$u_{00} = \sum_{r=2}^{r=p} [K_{r-1} - K_r] \sin \alpha_n x_r \qquad (p \neq 1) ;$$

$$u_{00} = 0 \quad (p = 1) ; \qquad u_{01} = K_p ,$$

et,

$$v(x) = \frac{1}{E} \sum_n \theta_n [v_{00} + v_{01} \cos \alpha_n x] ,$$

avec, $$v_{00} = \sum_{r=p+1}^{r=s+2} [K_r - K_{r-1}] \cos \alpha_n x_r \qquad (p \neq s+2) ;$$

$$v_{00} = 0 \quad (p = s+2) \quad ; \qquad v_{01} = K_p .$$

(XIII)

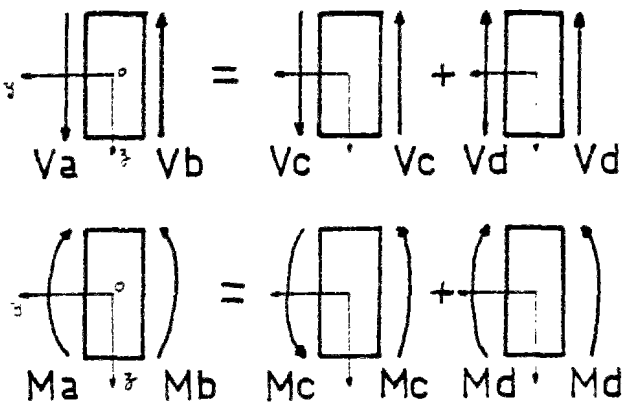
Les coefficients K_i , affectés à chacune des zones de la bande, essaient de tenir compte de l'influence de la rigidité variable de chaque zone.
Leur évaluation sera montrée ultérieurement.

Les fonctions θ_n , sont déduites de façon immédiate des expressions (II), (III), (V) et (VI), selon le type d'effort considéré.

c) Les fonctions ω_M , φ_{yM} , ω_V et φ_{yV} sont décomposées en deux :

$$\omega = \omega' + \omega''$$
$$\varphi_y = \varphi_y' + \varphi_y''$$

découlant à leur tour de la décomposition de la sollicitation en deux cas différents (fig. 2.13).



$$V_c = \frac{V_a + V_b}{2} \qquad M_c = \frac{M_b - M_a}{2}$$

$$V_d = \frac{V_b - V_a}{2} \qquad M_d = \frac{M_a + M_b}{2}$$

Fig. 2.13

Les fonctions ω'_M et φ'_{yM}, sont obtenues d'une étude en poutre de la bande soumise à un couple de moments M_c (x).

Les fonctions ω'_V et φ'_{yV}, sont déduites de la même façon pour la bande soumise à une paire de forces $V_c(x)$.

Les fonctions ω''_M et φ''_{yM}, et d'autre part ω''_V et φ''_{yV}, sont obtenues à partir des expressions propres de la flexion des plaques minces à épaisseur constante (VIII), (IX), (XI) et (XII), mais en y ajoutant des coefficients correcteurs dus à la rigidité variable du bossage. On aura donc des expressions de la forme :

$$\omega''(x) = \frac{1}{D} \sum_n \theta_n \left[v_{00} + v_{01} \cos \alpha_n x \right] \quad ;$$

$$\varphi''(x) = \frac{1}{D} \sum_n \theta_n \left[v_{00} + v_{01} \cos \alpha_n x \right] \quad , \qquad \text{(XIV)}$$

où v_{00} et v_{01} prennent la forme décrite en (XIII)

Les expressions de θ_n se dégagent des formules (VIII), (IX), (XI) et (XII), selon le type d'effort considéré.

d) Quant à l'évaluation des coefficients K_i, affectés à chacune des zones découpées dans la sous-structure, et qui essaient de prendre en compte les effets de la rigidité variable du bossage, nous avons adopté différents critères selon les types des deplacements et des efforts intervenant :

- évaluation de v_N : les coefficients K_i^{NN} sont évalués comme le rapport entre les raccourcissements de la fibre moyenne du hourdis dans les cas 1 et 2 de la fig. 2.14-a.

- évaluation de la φ_{yM} : les coefficients K_i^{MM} sont évalués comme le rapport entre les rotations dans les cas 1 et 2 de la fig.2.14-b.

- évaluation de u_T : les coefficients K_i^{TT} sont obtenus comme le rapport des contraintes au niveau du plan moyen du hourdis dans les cas 1 et 2 de la fig. 2.14-c, et avec l'hypothèse que la section reste plane (flexion composée) :

$$\sigma' = \frac{\sigma e}{h_i} + \frac{\sigma e (h_i - e)(h_i - e)}{2 \cdot 2 \cdot h_i^3 / 12} = \sigma e \left[1/h_i + 3(h_i - e)^2 / h_i^3 \right]$$

$$K_i^{TT} = \frac{\sigma'}{\sigma} = e \left[1/h_i + 3(h_i - e)^2 / h_i^3 \right]$$

- évaluation de w_V : les coefficients K_i^{VV} sont calculés comme le rapport des inerties de flexion entre le hourdis et la section 'i':

$$K_i^{VV} = e^3 / h_i^3$$

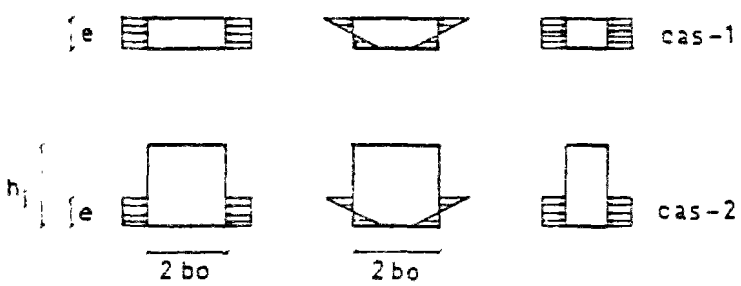


Fig.2.14-a Fig.2.14-b Fig.2.14-c

Pour les fonctions restantes nous utilisons des combinaisons entre ces coefficients:

evaluation u_N : $K_i^{NT} = 0.5 \left[K_i^{TT} + K_i^{NN} \right]$

" v_T : $K_i^{TN} = K_i^{NT}$

" w_M : $K_i^{MV} = 0.5 \left[K_i^{MM} + K_i^{VV} \right]$

" φ_{yV} : $K_i^{VM} = K_i^{MV}$

Pour l'obtention de K_i^{NN} et K_i^{MM} , nous avons calculé la solution élastique exacte des cas-2 des figures 2.14-a et 2.14-b. Chaque cas a été décomposé en cas symetrique et cas antisymétrique (fig.2.15). La solution a été obtenue d'après la méthode présentée par Gerald PICKETT (réf. 12)

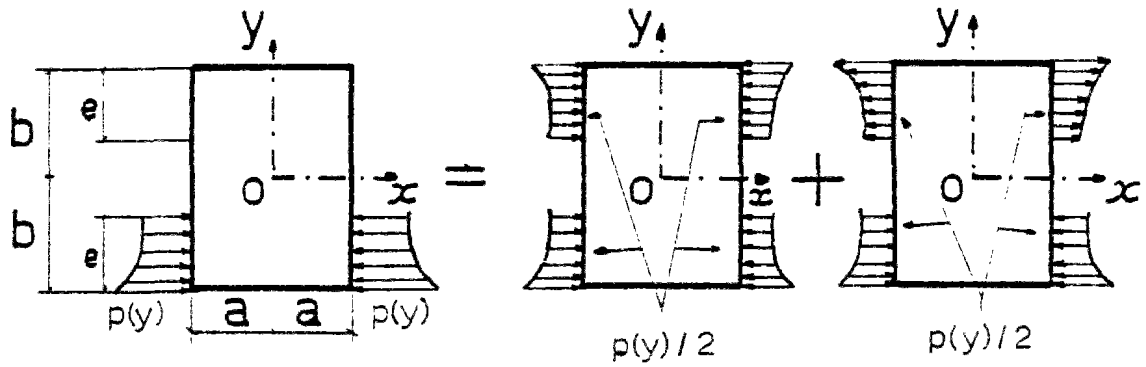
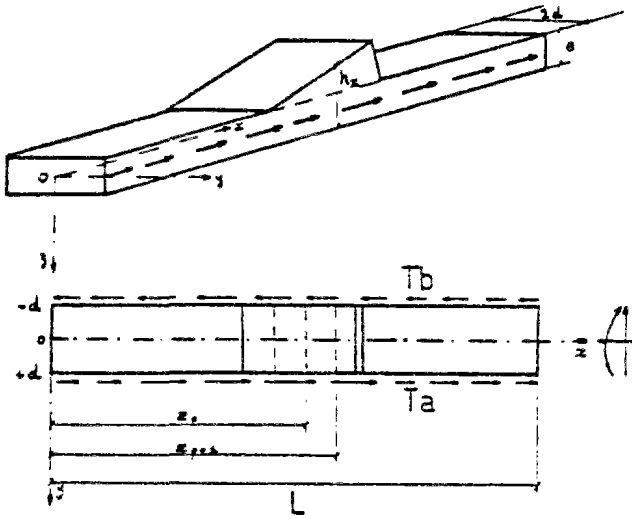


Fig. 2.15

2.3.2.2.2. Calcul des fonctions déplacements obtenues en supposant que la bande travaille comme une poutre

A. Flèches ω_T dues aux cisaillements le long des coupures (fig.2.16)



$$Ta(x) = \sum_n t_{an} \sin \alpha_n x \; ;$$

$$Tb(x) = \sum_n t_{bn} \sin \alpha_n x \; ;$$

$$\frac{dN(x)}{dx} = -e\left[Ta(x) - Tb(x)\right] = -eT'(x) \; ;$$

Pour $x = L$, $N(L) = 0$, donc :

$$N(x) = \int_L^x \frac{dN(x)}{dx}\, dx = e \sum_n \frac{t'_n(x)}{\alpha_n} \cos \alpha_n x \; ;$$

$$\mathcal{M}_b(x) = \frac{e(h_x - e)}{2} \sum_n \frac{t'_n(x)}{\alpha_n} \cos \alpha_n x \; .$$

Fig.2.16

La flèche d'un point 'x' tel que : $x_p < x < x_{p+1}$, est :

$$\omega(x) = \omega_0 - \int_0^x \frac{\mathcal{M}(\delta)}{E\, I(\delta)} (x - \delta)\, d\delta = \omega_0 - \frac{1}{E} \sum_{r=1}^{r=p-1} \int_{x_r}^{x_{r+1}} \frac{\mathcal{M}(\delta)}{I_r} (x - \delta)\, d\delta -$$

$$- \frac{1}{E} \int_{x_p}^{x} \frac{\mathcal{M}(\delta)}{I_p} (x - \delta)\, d\delta \; ,$$

et en integrant :

$$\omega(x)=\omega_0-\frac{e}{2E}\sum_{r=1}^{r=p-1}\frac{(h_r-e)}{I_r}\sum_n\frac{t'_n}{\alpha_n^2}\left[x\sin\alpha_n\delta-\delta\sin\alpha_n\delta-\frac{\cos\alpha_n\delta}{\alpha_n}\right]_{x_r}^{x_{r+1}}-$$

$$-\frac{e}{2E}\frac{(h_p-e)}{I_p}\sum_n\frac{t'_n}{\alpha_n^2}\left[x\sin\alpha_n\delta-\delta\sin\alpha_n\delta-\frac{\cos\alpha_n\delta}{\alpha_n}\right]_{x_p}^{x}.$$

Donc,

(XV)

Pour $x_p<x<x_{p+1}$,

$$\omega_T(x,\pm d)=-\frac{e}{2E}\sum_n\frac{(t_{an}-t_{bn})}{\alpha_n^2}\left[\omega_0+\omega_1+\omega_2 x+\omega_3\cos\alpha_n x\right],$$

avec

$$\omega_1=-\left[\sum_{r=1}^{r=p-1}\rho_r\left[\delta\sin\alpha_n\delta+\frac{\cos\alpha_n\delta}{\alpha_n}\right]_{x_r}^{x_{r+1}}\right]+\rho_p\left[x_p\sin\alpha_n x_p+\frac{\cos\alpha_n x_p}{\alpha_n}\right];$$

$$\omega_2=\left[\sum_{r=1}^{r=p-1}\rho_r\left[\sin\alpha_n\delta\right]_{x_r}^{x_{r+1}}\right]-\rho_p\sin\alpha_n x_p\ ;$$

$$\omega_3=-\rho_p/\alpha_n\qquad;\qquad\rho_r=\frac{h_r-e}{I_r}\ ;$$

$\omega_0=-[\omega_1+\omega_2 L]$, ω_1 et ω_2 obtenues avec $p=s+2$

Cela revient à etablir $\omega_T(L)=0$.

B. Déplacements u_y dus aux efforts verticaux le long des coupures (fig.2.17)

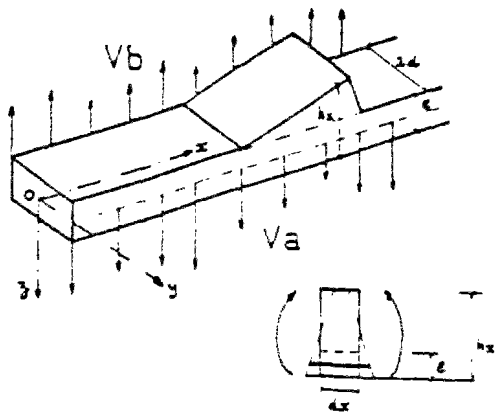


Fig 2.17

$$V_a(x)=\sum_n V_{an}\cos\alpha_n x\ ;$$

$$V_b(x)=\sum_n V_{bn}\cos\alpha_n x\ ;$$

$$\frac{dQ(x)}{dx}=-\left[V_a(x)-V_b(x)\right]=-V'(x).$$

Par symétrie $Q(0)=0$, donc :

$$Q(x)=\int_0^x\frac{dQ(x)}{dx}dx=-\sum_n\frac{V'_n}{\alpha_n}\sin\alpha_n x.$$

On peut aussi considérer que $\mathcal{M}(L)=0$, donc :

$$\mathcal{M}(x)=\int_L^x Q(x)\,dx=\sum_n \frac{V'_n}{\alpha_n^2}\cos\alpha_n x .$$

La contrainte au niveau du plan moyen de la plaque, est :

$$\sigma_x(x)=\frac{\mathcal{M}(x)}{I(x)}\frac{(h_x-e)}{2}=\sum_n \frac{V'_n(h_x-e)}{2\alpha_n^2 I_x}\cos\alpha_n x .$$

Et le déplacement 'u' :

$$u=\int_0^x \frac{\sigma_x(x)}{E}dx=\frac{1}{E}\left[\sum_{r=1}^{r=p-1}\left[\frac{(h_r-e)}{2I_r}\sum_n\frac{V'_n}{\alpha_n^2}\frac{[\sin\alpha_n x]_{x_r}^{x_{r+1}}}{\alpha_n}\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{(h_p-e)}{2I_p}\sum_n\frac{V'_n}{\alpha_n^2}\frac{[\sin\alpha_n x]_{x_p}^{x}}{\alpha_n}\right]$$

Pour $x_p < x < x_{p+1}$,

$$u_v(x,\pm d)=\frac{1}{2E}\sum_n\frac{(V_{an}-V_{pn})}{\alpha_n^3}\left[u_1+u_2\sin\alpha_n x\right], \qquad \text{(XVI)}$$

avec, $u_1=\left[\sum_{r=1}^{r=p-1}\rho_r\left[\sin\alpha_n\delta\right]_{x_r}^{x_{r+1}}\right]-\rho_p\sin\alpha_n x_p$;

$u_2=\rho_p$; $\rho_r=\dfrac{(h_r-e)}{I_r}$.

C. Déplacements ω'_v et φ'_{yv} dus à l'étude torsion d'une poutre soumise à une paire de forces (fig. 2.18)

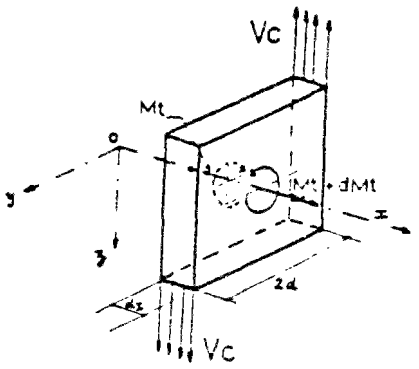


Fig.2.18

$$\frac{d\mathcal{M}_T(x)}{dx}=-2d\,V_c(x)=-[V_a(x)+V_b(x)]d=-V'(x)d .$$

Par symétrie, $\mathcal{M}_T(0)=0$,

$$\mathcal{M}_T(x)=\int_0^x -d\,V'(x)\,dx=-d\sum_n\frac{\sin\alpha_n x}{\alpha_n}V'_n ;$$

$$\varphi_y(x)=\varphi_y(0)+\int_0^x\frac{\mathcal{M}_T(x)\,dx}{G\,I_T(x)}=\varphi_y(0)+$$

$$+\frac{d}{G}\left[\left(\sum_{r=1}^{r=p-1}\frac{1}{I_{Tr}}\sum_n\frac{V'_n}{\alpha_n^2}\left[\cos\alpha_n x\right]_{x_r}^{x_{r+1}}\right)+\frac{1}{I_{Tp}}\sum_n\frac{V'_n}{\alpha_n^2}\left[\cos\alpha_n x\right]_{x_p}^{x}\right].$$

Pour $x_p < x < x_{p+1}$

$$\varphi'_{yv}(x,\pm d)=\frac{d}{G}\sum_n\frac{(V_{an}+V_{bn})}{\alpha_n^2}(\varphi_0+\varphi_1+\varphi_2\cos\alpha_n x)\ ;$$

avec,

$$\varphi_1=\left[\sum_{r=1}^{r=p-1}\rho_r\left[\cos\alpha_n\delta\right]_{x_r}^{x_{r+1}}\right]-\rho_p\cos\alpha_n x_p\ ;$$

$$\varphi_2=\rho_p\ ;$$

$\varphi_0=-\varphi_1(L)$, obtenue avec p = s + 2; cela revient à obliger $\varphi_{yv}(L)=0$;

$$\rho_r=\frac{1}{I_{Tr}}\ ;$$

$$I_{Tr}=q_r\frac{1}{3}a^3b\left[1-\frac{192}{\pi^5}\frac{a}{b}\sum_{n=1,3,5..}(1/n^5)\,th(n\pi b/2a)\right]\ ;$$

(voir TIMOSHENKO, réf.10),

avec , $a=\min(2d,h_r)$;

$b=\max(2d,h_r)$,

$$q_r=\begin{cases}0.5 & \text{pour } r=1 \text{ où } r=s+2\ ,\\ 1 & \text{dans les autres cas.}\end{cases}\qquad\text{(XVII)}$$

Et les flèches sont:

$$\boxed{w'_v(x,\pm d)=\pm\frac{d^2}{G}\sum_n\frac{(V_{an}+V_{bn})}{\alpha_n^2}(\varphi_0+\varphi_1+\varphi_2\cos\alpha_n x)}\qquad\text{(XVIII)}$$

D. Déplacements w'_M et φ'_{yM} dus à l'étude torsion d'une poutre soumise à un couple de moments (fig.2.19)

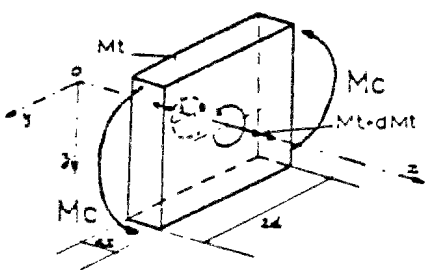


Fig. 2.19

Ici, $\frac{dM_T(x)}{dx}=-2M_c(x)=-[M_D(x)-M_a(x)]$, et en agissant de même que dans le cas précédent :

$$\boxed{\varphi'_{yM}(x, \pm d) = \frac{1}{G} \sum_n \frac{(m_{bn} - m_{an})}{\alpha_n^2} [\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 \cos \alpha_n x],} \quad \text{(XIX)}$$

et,

$$\boxed{\omega'_M(x, \pm d) = \pm \frac{d}{G} \sum_n \frac{(m_{bn} - m_{an})}{\alpha_n^2} [\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 \cos \alpha_n x].} \quad \text{(XX)}$$

E. Flèches ω_{PR} dues à la précontrainte (fig.2.20)

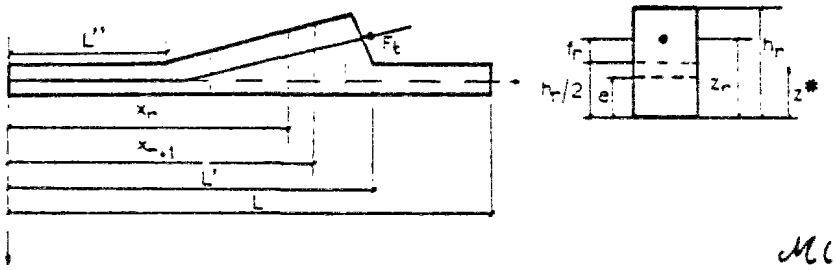


Fig. 2.20

La loi des moments fléchissants a la forme :

$\mathcal{M}(x) = 0$ pour $x > L'$;

$\mathcal{M}(x) = F_t \cos\beta_r f_r$ pour $0 < x < L'$,

avec $f_r = z_r - h_r/2$ et $\cos\beta_r = \cos(\text{arc.tg.} \frac{z_{r+1} - z_r}{x_{r+1} - x_r})$.

Les formules de Bresse donnent :

$$\omega(x) = \omega(0) - \int_0^x \frac{\mathcal{M}(\delta)}{EI(\delta)} (x - \delta) d\delta \quad ;$$

$$\varphi_x(x) = \varphi_x(0) - \int_0^x \frac{\mathcal{M}(\delta)}{EI(\delta)} d\delta \quad , \text{ et par symétrie : } \varphi_x(0) = 0.$$

Sections $0 < x < L'$:

$$\omega(x) = \omega_0 - \frac{F_t}{E} \sum_{r=1}^{r=p-1} \frac{f_r \cos\beta_r}{I_r} [x\delta - \frac{\delta^2}{2}]_{x_r}^{x_{r+1}} - \frac{F_t}{E} \frac{f_p \cos\beta_p}{I_p} [x\delta - \frac{\delta^2}{2}]_{x_p}^{x} ;$$

$$\varphi_x(x) = -\frac{F_t}{E} \sum_{r=1}^{r=p-1} \frac{f_r \cos\beta_r}{I_r} [x_{r+1} - x_r] - \frac{F_t}{E} \frac{f_p \cos\beta_p}{I_p} [x - x_p] .$$

Sections $x > L'$:

$$\omega(x) = \omega(L') + \varphi_x(L')(x - L') ,$$

où $\omega(L')$ et $\varphi_x(L')$ sont obtenues en prenant x = L' dans les expressions précédentes.

On a donc, pour $x_p < x < x_{p+1}$,

Si $0 < x < L'$:

$$\omega_{pR} = -\frac{F_T}{E}\left[\omega_4 + \omega_5 + \omega_6 x + \omega_7 x^2\right] ,$$

avec,

$$\omega_5 = -\left[\sum_{r=1}^{r=p-1} \frac{\rho_r}{2}\left(x_{r+1}^2 - x_r^2\right)\right] + \frac{\rho_p}{2} x_p^2 \quad ;$$

$$\omega_6 = \left[\sum_{r=1}^{r=p-1} \rho_r (x_{r+1} - x_r)\right] - \rho_p x_p \quad ;$$

$$\omega_7 = \rho_p / 2 \quad ; \qquad \rho_r = \frac{f_r \cos\beta_r}{I_r} . \qquad \text{(XXI)}$$

Si $x > L'$:

$$\omega_{pR} = -\frac{F_t}{E}\left[\omega_4 + \omega_8 + \omega_9 x\right] ,$$

avec,

$$\omega_8 = \left[\sum_{r=1}^{r=s+1} \rho_r \left[L'\delta - \delta^2/2\right]_{x_r}^{x_{r+1}}\right] - L' \sum_{r=1}^{r=s+1} \rho_r (x_{r+1} - x_r) \quad ;$$

$$\omega_9 = \sum_{r=1}^{r=s+1} \rho_r \left[x_{r+1} - x_r\right] \quad ;$$

$\omega_4 = -\left[\omega_8(L) + L\ \omega_9(L)\right]$, cela revient à imposer $\omega(L) = 0$.

F. Déplacements u_{pR} et v_{pR} dus à la précontrainte

On va faire une étude plane. L'influence du bossage est prise en compte en considérant que la contrainte σ_x est celle qui correspond à la fibre du plan moyen du hourdis.

$$\sigma_x(x) = \frac{-F_T \cos\beta_x}{2d\, h_x}\left[1 - \frac{6 f_x}{h_x}\left[1 - \frac{e}{h_x}\right]\right] ,$$ l'effort normal est donc :

$$N_x(x) = \frac{-F_T\, e \cos\beta_x}{h_x}\left[1 - \frac{6 f_x}{h_x}\left[1 - \frac{e}{h_x}\right]\right].$$

Le calcul est décomposé en deux parties (fig. 2.21) : une avec les déformations ε_y empêchées et autre dans laquelle on applique dans le sens inverse les contraintes σ_y nécessaires pour empêcher les ε_y du cas précédent :

$$u_{pR} = u_{pRA} + u_{pRB} \quad ;$$

$$v_{pR} = v_{pRB}$$

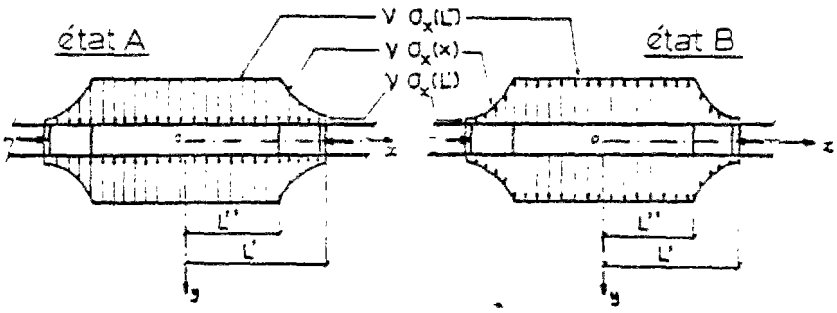


Fig.2.21-a Fig. 2.21-b

Obtention de u_{pRA} :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu\sigma_y\right] = \frac{\sigma_x}{E}(1-\nu^2) \;, \quad \text{et puisque } \varepsilon_y = (\sigma_y - \nu\sigma_x)/E = 0 \Longrightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma_y = \nu\sigma_x \Longrightarrow u_x = \int_0^x \varepsilon_x\, dx = -\frac{(1-\nu^2)}{E}\,\frac{F_T}{2d}\int_0^x \frac{\cos\beta x}{h_x}\left[1 - \frac{6\ell x}{h_x}\left[1 - \frac{e}{h_x}\right]\right] dx .$$

Si l'on intègre :

Pour $x_p < x < x_{p+1}$:

Si $0 < x < L'$:

$$u_{pRA}(x, \pm d) = -\frac{F_T(1-\nu^2)}{2dE}\left[u_3 + u_4 x\right],$$

avec,

$$u_3 = \left[\sum_{r=1}^{r=p-1} \rho_r (x_{r+1} - x_r)\right] - \rho_p x_p \;;$$

$$u_4 = \rho_p \qquad ; \qquad \rho_r = \frac{\cos\beta r}{h_r}\left[1 - \frac{6\ell r}{h_r}\left[1 - \frac{e}{h_r}\right]\right]. \qquad \text{(XXII)}$$

Si $x > L'$:

$$u_{pRA}(x, \pm d) = u_5 \frac{-F_T(1-\nu^2)}{2dE} \;,$$

avec,

$$u_5 = u(L') = \sum_{r=1}^{r=s+1} \rho_r (x_{r+1} - x_r) \;.$$

Obtention de u_{PAR} et v_{PAR} :

Ils sont obtenus d'après les expressions correspondantes à la sous-structure soumise à deux efforts normaux Na (x) et Nb (x) le long de la coupure, en faisant $f_{an} = f_{bn} = p_n$, c'est-à-dire, avec $N_a(x) = N_b(x) = \sum_{n=1,3\ldots} p_n \cos \alpha_n x$, où les p_n sont obtenus en développant en Séries de Fourier les contraintes σ_y de la fig. 2.21-b :

$$p_n = \frac{2}{L}\int_0^L f(x)\cos\frac{n\pi x}{2L}\,dx = \frac{2}{L}\sum_{r=1}^{r=s+1} \vartheta\,\frac{F_T}{2d}\,\rho_r\,\frac{2L}{n\pi}\left[\sin\frac{n\pi\delta}{2L}\right]_{x_r}^{x_{r+1}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} p_n &= \frac{4\,F_T\,\vartheta}{2dn\pi}\sum_{r=1}^{r=s+1}\rho_r\left[\sin\frac{n\pi\delta}{2L}\right]_{x_r}^{x_{r+1}}, \\ \text{avec,}\quad \rho_r &= \frac{\cos\beta_r}{h_r}\left[1-\frac{6\,f_r}{h_r}\left[1-\frac{e}{h_r}\right]\right]. \end{aligned}} \qquad \text{(XXIII)}$$

2.3.3. Conditions de liaison hourdis-parois latérales

Les conditions aux bords latéraux du hourdis, ont déjà été expliquées dans le paragraphe 2.2. Nous pouvons les résumer telles que voici :

$w(x) = 0$; $v(x)$, libre ;

$\varphi_y(x) = 0$; $u(x)$ (hourdis) $= u(x)$ (parois latérales)

tout le long de la ligne de jonction.

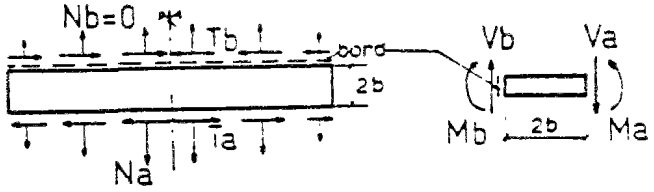


Fig. 2.22

Nous allons maintenant établir les expressions analytiques de ces conditions, qui vont permettre d'exprimer les efforts inconnus :

$N_b(x)$, $T_b(x)$, $M_b(x)$ et $V_b(x)$, agissant sur le côté y=-b de la bande

extrême du hourdis (fig.2.22), en fonction des efforts inconnus $N_a(x)$, $T_a(x)$, $M_a(x)$ et $V_a(x)$, agissant sur le côté y = + b. Le nombre total d'inconnues à résoudre est donc :
$4 \times N \times n_c$, avec N = nombre de termes du développement de Fourier et n_c = le nombre de coupures.

A. Etude plane (fig.2.6)

L'hypothèse $v_b(x, -b)$ libre, entraîne $N_b(x)=0$ et donc $f_{bn}=0$.
Puis, nous avons les équations de compatibilité des déplacements :

$$u_b(x,-b) = u_c(x,c) = u_d(x,-d),$$

$$v_c(x,c) = v_d(x,-d),$$

avec,

$$u_b(x,-b) = \frac{1}{E}\sum_n \left[\frac{B(b)}{\alpha_n} f_{an} - \frac{F(b)}{\alpha_n} t_{an} - \frac{E(b)}{\alpha_n} t_{bn} \right] \sin \alpha_n x \; ;$$

$$u_c(x,c) = \frac{1}{E}\sum_n \left[\frac{A(c)}{\alpha_n} f_{cn} + \frac{E(c)}{\alpha_n} t_{cn} \right] \sin \alpha_n x \; ;$$

$$u_d(x,-d) = \frac{1}{E}\sum_n \left[\frac{A(d)}{\alpha_n} f_{dn} + \frac{E(d)}{\alpha_n} t_{dn} \right] \sin \alpha_n x \; ;$$

$$v_c(x,c) = \frac{1}{E}\sum_n \left[\frac{C(c)}{\alpha_n} f_{cn} + \frac{G(c)}{\alpha_n} t_{cn} \right] \cos \alpha_n x \; ;$$

$$v_d(x,-d) = \frac{1}{E}\sum_n \left[\frac{-C(d)}{\alpha_n} f_{dn} - \frac{G(d)}{\alpha_n} t_{dn} \right] \cos \alpha_n x \; ,$$

(voir formules (II), (III), (V), et (VI)).

Par équilibre, nous avons aussi :

$$N_c(x) = N_d(x) \longrightarrow f_{cn} = f_{dn} = f_n \; , \qquad (a)$$

$$T_b(x) = T_c(x) + T_d(x) \longrightarrow t_{bn} = t_{cn} + t_{dn} \; , \qquad (b)$$

et,

$$u_c = u_d \longrightarrow [A(c) - A(d)]\, f_n = \alpha f_n = E(d)\, t_{dn} - E(c)\, t_{cn} =$$

$$= E(d)\, t_{bn} - [E(c) + E(d)]\, t_{cn} \longrightarrow$$

$$\alpha f_n = E(d)\, t_{bn} - \gamma t_{cn} \; , \text{ où } \gamma = E(c) + E(d), \qquad (c)$$

$$v_c = v_d \longrightarrow \quad [C(c) + C(d)]\, f_n = \beta f_n = -\left(G(d)\, t_{dn} + G(c)\, t_{cn}\right) =$$
$$= -G(d)\, t_{bn} - \left(G(c) - G(d)\right) t_{cn} ,$$

Mais, dans les expressions (II) et (VI), on peut voir que G (d) = A(d). Ce résultat aurait pu être obtenu par application du théorème de la réciprocité. On a donc, $\beta f_n = -A(d)\, t_{bn} - \alpha\, t_{cn}$. (d)

$$\boxed{\begin{aligned} &(c) \text{ et } (d) \longrightarrow \quad t_{cn} = \frac{\beta E(d) + \alpha A(d)}{\beta\gamma - \alpha^2}\, t_{bn} ; \\ &f_{cn} = f_{dn} = f_n = -\frac{\alpha E(d) + \gamma A(d)}{\beta\gamma - \alpha^2}\, t_{bn} ; \\ &\text{avec,} \\ &\qquad \gamma = E(c) + E(d) ; \\ &\qquad \alpha = A(c) - A(d) ; \\ &\qquad \beta = C(c) + C(d) ; \\ &(b) \longrightarrow \quad t_{dn} = \frac{\beta E(c) - \alpha A(c)}{\beta\gamma - \alpha^2}\, t_{bn} . \end{aligned}} \qquad \text{(XXIV-a)}$$

Et $u_b = u_c \longrightarrow B(b)\, f_{an} - F(b)\, t_{an} - E(b)\, t_{bn} = A(c)\, f_n + E(c)\, t_{cn}$, en remplaçant f_n et t_{cn} par les expressions (XXIV - a), on arrive à :

$$\boxed{\begin{aligned} &t_{bn} = \frac{B(b)}{\delta + E(b)}\, f_{an} - \frac{F(b)}{\delta + E(b)}\, t_{an} ; \\ &\text{avec,} \\ &\delta = \frac{\beta E(c) E(d) - E(c) A(d)^2 - E(d) A(c)^2}{\beta\gamma - \alpha^2} . \end{aligned}} \qquad \text{(XXIV-b)}$$

Les équations (XXIV) permettent de définir les trois sous-structures (b, c et d, de la fig. 2.6) uniquement en fonction des efforts Na (x) et Ta (x) le long de la coupure.

B - Etude à flexion

Il faut maintenant imposer $\omega(x) = \varphi_y(x) = 0$ le long de la jonction hourdis-parois.

En se reportant aux formules (VIII), (IX), (XI) et (XII) :

$$\omega(x,-b)=0 \longrightarrow \frac{1}{2}\left(N(b)m_{an}+M(b)m_{bn}\right)+\frac{1}{\alpha_n(1-\nu)}\left(R(b)v_{an}+Q(b)v_{bn}\right)=0\ ;$$

$$\varphi_y(x,-b)=0 \longrightarrow \frac{-1}{(1-\nu)}\left(P(b)m_{an}+O(b)m_{bn}\right)+\frac{1}{2\alpha_n}\left(T(b)v_{an}+S(b)v_{bn}\right)=0,$$

ce qui donne :

(XXV)

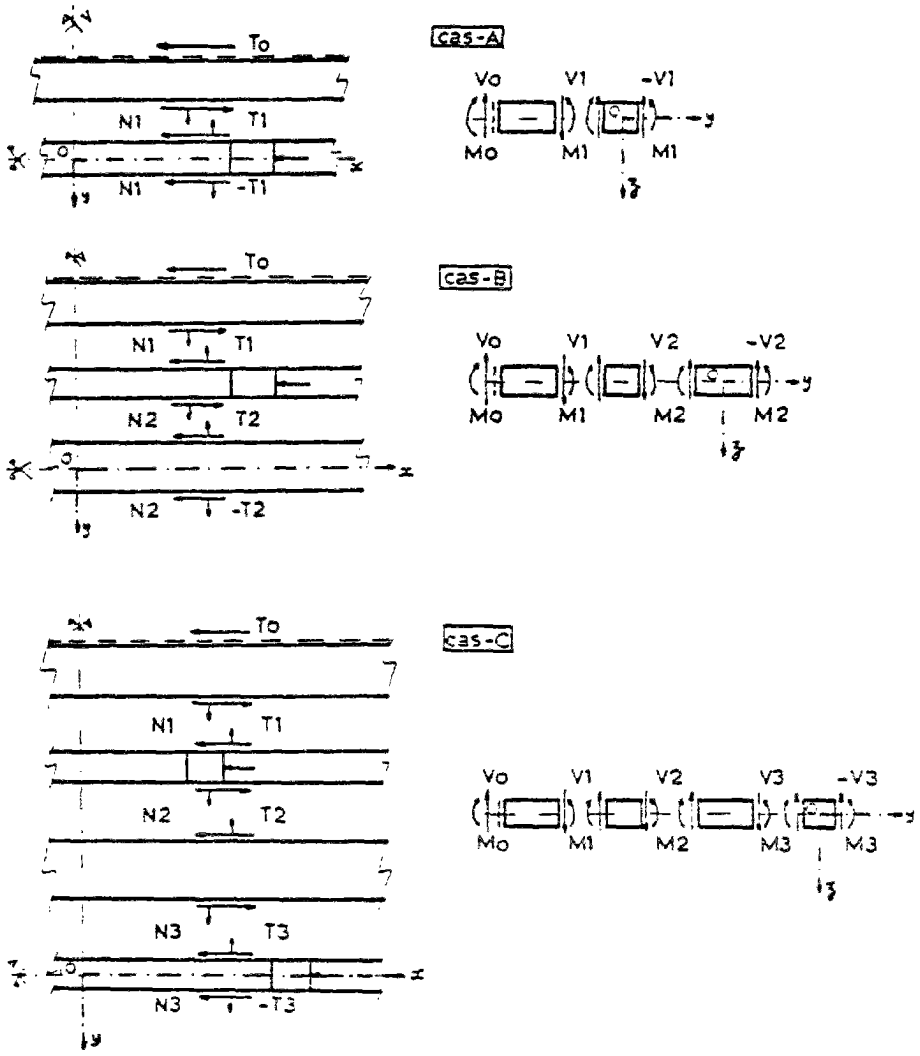
$$v_{bn}=\frac{1}{\psi}\left[\frac{-1}{2(1-\nu)}\left[O(b)N(b)-P(b)M(b)\right]m_{an}+\left[\frac{T(b)M(b)}{4\alpha_n}+\frac{O(b)R(b)}{\alpha_n(1-\nu)^2}\right]v_{an}\right];$$

$$m_{bn}=\frac{1}{\psi}\left[\left[\frac{N(b)S(b)}{4\alpha_n}+\frac{P(b)Q(b)}{\alpha_n(1-\nu)^2}\right]m_{an}+\frac{1}{2\alpha_n^2(1-\nu)}\left[R(b)S(b)-T(b)Q(b)\right]v_{an}\right],$$

avec, $\psi=-\frac{1}{\alpha_n}\left[\frac{M(b)S(b)}{4}+\frac{Q(d)O(d)}{(1-\nu)^2}\right].$

2.3.4. Formation du système d'équations

En établissant les conditions aux limites dans les termes du paragraphe précédent, on ramène le problème à la détermination de $4 \times N \times n_c$ inconnues (fig. 2.23). 'N' étant le nombre de termes du développement de Fourier, et n_c le nombre de coupures.



	cas	A	B	C
nombre	bossages (nb)	1	2	3
	coupures (nc)	1	2	3
	inconnues	4 N	8 N	12 N

Fig. 2.23

En prenant l'égalite des deplacements u, v, w, φ_y tout le long des deux lèvres de chaque coupure, nous parvenons à un système de 4 n_c équations de la forme :

$$\sum_n \left[a_n + b_n x + c_n x^2 + d_n \begin{Bmatrix} \sin \alpha_n x \\ \text{ou} \\ \cos \alpha_n x \end{Bmatrix} \right] + K = 0 \quad ;$$

où a_n, b_n, c_n, d_n et K sont obtenus à partir des expressions (I) à (XXV). Ils sont une combinaison de certains coefficients et des inconnues du problème.

En multipliant chacune des équations par $\begin{Bmatrix} \sin \alpha_m x \\ \text{ou} \\ \cos \alpha_m x \end{Bmatrix}$, avec $m = 1, 3, 5 - - - (2N-1)$, et en intégrant entre les limites $x = -L$ et $x = L$, on obtient N équations de chacune des 4 n_c précédentes.

Nous parvenons ainsi à un système de 4 n_c N équations pour résoudre le problème. Cela revient aussi à écrire, le long de chaque coupure, l'égalité des travaux effectués par chacune des N composantes (f_n, t_n, w_n, et v_n) des quatre efforts inconnus (N, T, M et V).

Le système, auquel nous arrivons, a la forme suivante :

$$\left[\sum_n \delta_{jnm}^{NN} f_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{TN} t_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{MN} m_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{VN} v_{in}\right]_{i=1,nc} = -\delta_{jm}^{PR\,N} \;;$$

$$\left[\sum_n \delta_{jnm}^{NT} f_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{TT} t_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{MT} m_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{VT} v_{in}\right]_{i=1,nc} = -\delta_{jm}^{PR\,T} \;;$$

$$\left[\sum_n \delta_{jnm}^{NM} f_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{TM} t_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{MM} m_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{VM} v_{in}\right]_{i=1,nc} = -\delta_{jm}^{PR\,M} \;;$$

$$\left[\sum_n \delta_{jnm}^{NV} f_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{TV} t_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{MV} m_{in} + \sum_n \delta_{jnm}^{VV} v_{in}\right]_{i=1,nc} = -\delta_{jm}^{PR\,V}$$

$n = 1,3,5 - - - (2\,N - 1)$; $m = 1,3,5 -- (2\,N - 1)$; $j = 1,2,\ n_c$

Un terme quelconque δ_{jnm}^{TN} représente par exemple le travail effectué par $f'_{jm} = \sin \frac{m\pi x}{2L}$ dans les déplacements induits par $t'_{in} = \cos \frac{n\pi x}{2L}$.

C'est la présence du bossage qui fait que les termes δ_{jnm}, avec $n \neq m$, ne soient pas nuls.

2.3.5. Résolution du système

Pour la résolution du système d'équations, nous avons utilisé la méthode itérative de Gauss-Seidel, avec un coefficient de surrelaxation variable au cours des itérations (méthode présentée par F.G. LEHMAN (réf. 13).

2.3.6. Obtention des contraintes

Une fois que les coefficients f_{in}, t_{in}, m_{in}, v_{in}, sont connus, on peut connaître l'état de contraintes en tout point de la structure.

2.3.6.1. Bandes n'ayant pas d'ancrage

Les contraintes sont obtenues par addition des différents états élémentaires :

$$\sigma_x = \sigma_x^N + \sigma_x^T + \sigma_x^M + \sigma_x^V \;;$$

$$\sigma_y = \sigma_y^N + \sigma_y^T + \sigma_y^M + \sigma_y^V \;;$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xy}^N + \tau_{xy}^T + \tau_{xy}^M + \tau_{xy}^V \,.$$

Les contraintes dues aux efforts normal et tangent sont constantes dans toute la section. Elles sont calculées d'après les expressions (A) du paragraphe 2.3.2.1. Celles dues aux moments fléchissants et aux efforts verticaux, présentent une variation linéaire sur la hauteur de la section, et sont calculées d'après :

$$\sigma_x = \frac{12\, M_x\, z}{e^3} \;,\quad \sigma_y = \frac{12\, M_y\, z}{e^3} \;;\quad \tau_{xy} = -\frac{12\, M_{xy}\, z}{e^3} \,,$$

'e' étant l'épaisseur de la dalle.

Les valeurs de M_x, M_y et M_{xy}, sont obtenues d'après les expressions (B) du paragraphe 2.3.2.1.

2.3.6.2. Bandes munies d'un bossage

Dans le bossage, il faudra ajouter l'état de contraintes dû à la précontrainte : σ_x^{PR}, σ_y^{PR} et τ_{xy}^{PR}.

Comme l'on a déjà vu lors de la description de ces sous-structures, l'état de sollicitations est décomposé en plusieurs cas simples dont la résolution se fait, soit par approximation des expressions obtenues pour les bandes sans bossage, en ajoutant des coefficients correcteurs 'K' qui tiennent compte de la plus grande raideur du bossage, soit par une étude poutre. Le choix est fonction du type de sollicitation. On va suivre le même critère pour l'obtention des contraintes.:

I - Quand on applique les formules de plaques à épaisseur constante, aux points du bossage, les mêmes coefficients K sont utilisés lors de l'évaluation des contraintes.

2 - Les contraintes calculées par une étude ou poutre, sont la somme de

a) Contraintes dues à la précontrainte (fig. 2.20 et 2.21) :

Le calcul de la précontrainte a été fait en deux étapes (cf. paragraphe 2.3.2.2.2.F). Les contraintes dans l'état 'B' sont calculées comme dans 1). Quant à celles de l'état 'A' :

$$\sigma_x = \begin{cases} \dfrac{-F_T \cos\beta_r}{h_t \cdot 2d}\left[1 - \dfrac{12 f_r}{h_r}\left[\dfrac{1}{2} - \dfrac{z^*}{h_r}\right]\right] & (\text{pour } x<L',\ \text{et } x_r<x<x_{r+1}); \\ 0 \quad (\text{pour } x>L') ; \end{cases}$$

$$\sigma_y = \nu\,\sigma_x \quad ; \quad \tau_{xy} = 0 .$$

b) Contraintes dues à la flexion entrainée par les efforts de cisaillement le long des coupures :

$$\sigma_x = \frac{N(x)}{2d\,h_x} + \frac{12\,M(x)\,[h_x/2 - z^*]}{2d\,h_x^3} \quad ; \quad \sigma_y = \tau_{xy} = 0 ,$$

avec :

$$M(x) = \sum_n \frac{(\tan - t_{bn})}{\alpha_n}(\cos\alpha_n x)\frac{e(h_x - e)}{2} ;$$

$$N(x) = \sum_n \frac{(\tan - t_{bn})}{\alpha_n}(\cos\alpha_n x)\cdot e .$$

c) Contraintes dues à la torsion entrainée par les moments fléchissants et les efforts verticaux :

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 ;$$

$$\tau_{xy} = \begin{cases} \dfrac{-12\,M_T(x)\,z}{2\,d\,e^3} & (\text{en dehors du bossage}) ; \\ \dfrac{-2\,M_T(x)}{W_T \cdot h_x}\left(\dfrac{h_x}{2} - z^*\right) & (\text{à l'intérieur du bossage}) ; \\ \text{avec } W_T = \dfrac{2d\,h_x^2}{3+1.8n} ;\ n = \dfrac{a}{b} ;\ a>b & (\text{TIMOSHENKO, réf. 10}) . \end{cases}$$

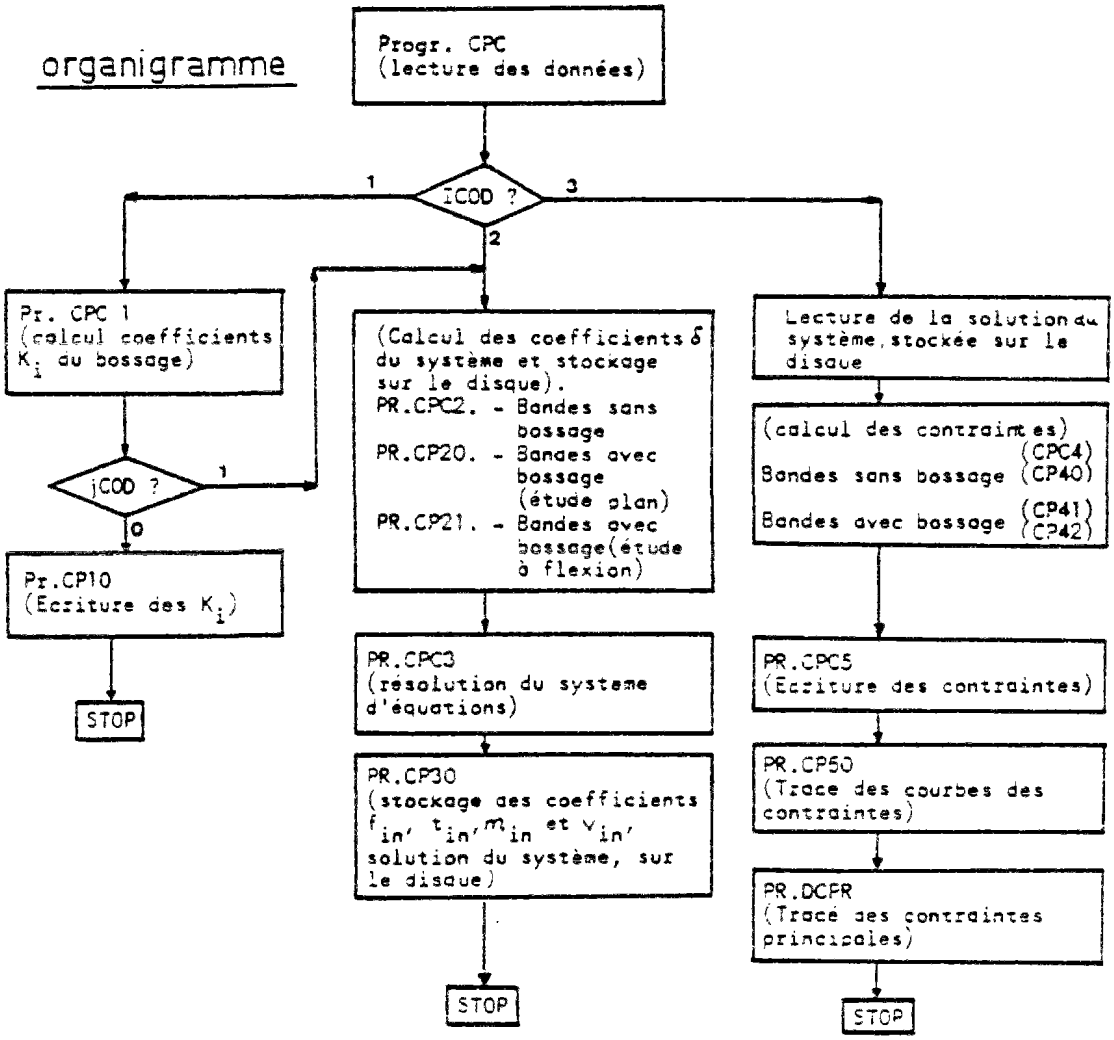
2.3.7. <u>Programmation sur ordinateur</u>

Nous avons mis au point un programme de calcul qui nous permet d'obtenir l'état de contraintes élastiques en tout point de la structure, par la théorie que nous venons d'exposer.

Le programme peut analyser l'effet du regroupement de bossages. On peut y introduire jusqu'à quatre bossages sous la seule condition de respecter la symétrie par rapport à l'axe de la pièce. Avec un ordinateur de plus grande capacité, on pourrait augmenter le nombre d'ancrages.

Du fait de la petite capacité de l'ordinateur utilisé (9 K accessibles) on s'est vu obligé de découper le programme en plusieurs sous-programmes et surtout, de stocker sur les disques une grande quantité de résultats intermédiaires, en particulier, les coefficients δ du système d'équations, ainsi que les solutions f_{in}, t_{in}, m_{in} et v_{in} de celui-ci.

Les subroutines BWR et SWO, sont spécifiques aux transferts entre la mémoire centrale et le disque. Cela est important parce que lors du calcul et même lors de la résolution du système d'équations, seulement une petite partie des coefficients peut être gardé en mémoire.



Les listings du programme sont groupés dans l'Annexe B.

2.4. Limitations de la méthode

La méthode telle qu'elle a été exposée, et comme l'on verra plus loin dans l'analyse des résultats, s'est avérée être un moyen satisfaisant pour obtenir l'état des contraintes dans le hourdis. Elle nous permet de connaître les flexions dangereuses qui se produisent, ainsi que les effets du regroupement de bossages et ceux dus à la variation de différents paramètres intervenant dans le problème.

Il nous faut néanmoins dégager ses principales limitations pour mieux connaître la portée des résultats obtenus :

1° - La méthode est élastique. Elle ne prend pas en compte les phénomènes de fissuration et de non linéarité du béton, ainsi que de la présence des aciers passifs.

2° - Elle ne permet d'étudier ni la diffusion de la précontrainte dans le bossage, ni les effets locaux dus à la poussée au vide du câble. Ceux-ci sont des phénomènes tridimensionnels, qui ont été étudiés par la méthode des éléments finis par LY .

3° - Elle suppose tous les efforts inconnus développés en séries de Fourier. Mais celles-ci s'adaptent mal à proximité des points de discontinuité.

4° - L'hypothèse de déformation plane des sections, utilisée dans les équations des plaques minces et des poutres, est assez vraisemblable sauf au droit de zones de forte discontinuité de section, ce qui doit certainement y entraîner des déformations non planes.

5° - Les équations sont établies en égalisant les travaux totaux des efforts inconnus tout le long des coupures. Cela n'assure pas forcément la compatibilité des déplacements, voir des déformations, point par point à la coupure, mais celle des travaux sur toute la longueur.

— Les limitations 3, 4, 5 produisent une forte pointe des contraintes calculées dans la zone de forte discontinuité géométrique, qui existe juste derrière l'ancrage. Cette pointe, dans la réalité, est nettement plus adoucie (cf. chapitre 5).

CHAPITRE 3

APPLICATION DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

3.1. - Introduction

La méthode des coupures nous a permis d'obtenir, d'une façon approchée, la distribution des contraintes dans le hourdis, en tenant compte des flexions locales dues à la charge excentrée par l'intermédiaire d'un bossage relativement rigide par rapport au hourdis.

Cette étude, limitée au domaine de l'élasticité linéaire, est complétée ici par une autre qui va essayer de mieux approcher l'état de contraintes dans la plaque, au fur et à mesure de l'augmentation de la précontrainte. On aborde donc le problème de non-linéarité due à la fissuration, au comportement non-linéaire du béton en compression, non homogénéité béton-armatures, etc.

Cette étude est abordée par la méthode des éléments finis, au moyen d'un programme qui prend en compte toutes les conditions de non-linéarité que l'on vient de citer.

Pour des raisons de capacité d'ordinateur, cette étude a été menée en deux phases :

- En une première, nous nous sommes limités aux efforts dans le plan moyen du hourdis, sans y tenir compte des flexions locales qui apparaissent (étude bidimensionnelle).

- Dans la deuxième, en conservant la structure générale du programme bidimensionnel, et aux dépens d'une réduction du nombre total d'éléments, nous avons incorporé l'étude des phénomènes de flexion.

3.2. - Calcul des structures en béton armé par la méthode des éléments finis.

3.2.1. - Considérations générales

—L'évaluation analytique des contraintes et des déformations dans les structures de béton armé, au fur et à mesure de l'augmentation des charges, est d'une grande complexité. Parmi les aspects de ce type de structures qui ne peuvent pas être abordés par des méthodes de calcul traditionnelles, nous pouvons citer :

1. - la non homogénéité, nous avons deux matériaux différents : l'acier et le béton ;

2. - le changement de la structure au fur et à mesure du chargement, du fait de la fissuration du béton ;

3. - le béton aussi bien que l'acier, ne présentent pas un comportement linéaire jusqu'à la rupture. Pour l'acier, le comportement est assez proche d'un diagramme $\sigma-\varepsilon$ élastoplastique. Pour le béton le problème se complique, non seulement du fait de la non-linéarité de la relation $\sigma-\varepsilon$ dans les fortes compressions, mais surtout à cause du caractère bidimensionnel de son état de contraintes dans la plupart des structures. Les lois de comportement et les critères de rupture sous des efforts combinés , sont complexes et fonctions de nombreux paramètres dont l'influence n'est toujours pas décelée. Jusqu'à présent, on dispose uniquement de résultats sous une application proportionnelle de la charge : $\alpha = \sigma_I/\sigma_{II}$, constante le long de l'essai ;

4. - les déformations du béton varient dans le temps, à cause surtout des phénomènes de fluage et de retrait ;

5. - il existe en plus une série de phénomènes peu connus et dont l'influence n'est pas négligeable : effet de goujon dans les aciers, adhérence béton-acier, glissements entre le béton et l'acier dus à la perte de l'adhérence au delà d'un certain point, engrénement entre les deux faces des fissures, etc. Tous ces facteurs ne sont pas aisément évaluables et leur prise en compte ne peut se faire que d'une façon grossière.

Le problème peut donc être défini comme "inélastique et non-linéaire pour un corps anisotrope et non-homogène".

— La première application de la méthode des éléments finis aux structures en béton armé date de 1967, par NGO & SCORDELIS (réf 14). Depuis, de nombreux travaux ont été présentés. Dans l'annexe A , nous présentons une mise au jour de l'état d'avancement des recherches sur ce point.

3.2.2. - Approximation du calcul non-linéaire par l'intermédiaire d'une suite d'analyses linéaires.

— Nous allons nous limiter à l'étude des phénomènes de courte durée avec un chargement monotone, c'est-à-dire, sans considérer des cycles chargement-déchargement.

Les causes principales de non-linéarité qui vont être prises en compte sont de deux ordres :

a) fissuration du béton. C'est la principale puisqu'elle entraîne d'importantes redistributions de contraintes dans la structure;

b) comportement non-linéaire du béton sous charges biaxiales et écoulement de l'acier au delà de sa limite élastique.

Nous allons aussi supposer que les déformations restent dans les limites de la théorie de petits déplacements. Il n'y aura donc pas de phénomènes de non-linéarité géométriques.

— La méthode des éléments finis a connu un tel essor depuis son apparition aux alentours de 1960 que nous ne considérons pas nécessaire de rappeler ici ses fondements. Son application au calcul linéaire de structures peut être schématisé comme suit (nous suivons la nomenclature et la formulation utilisées par ZIENKIEWICZ (réf 15)) :

a) On adopte une fonction de déplacements continue à l'intérieur de chaque élément : $\{f\}^e = [N]^e \{\delta\}^e$, qui relie les déplacements en tout point de l'élément à ceux des noeuds. Cette fonction doit accomplir certaines conditions de convergence.

b) Par différentiation d'après les formules d'élasticité, on obtient la relation entre les déformations à l'intérieur de l'élément et les déplacements aux noeuds.

$$\{\varepsilon\}^e = [B]^e \{\delta\}^e \quad (1)$$

c) Les contraintes et les déformations sont liées par une relation linéaire de la forme : $\{\sigma\}^e = \{\sigma_0\}^e + [D]^e \{\varepsilon - \varepsilon_0\}^e$ (2) ;
où $\{\sigma_0\}^e$ et $\{\varepsilon_0\}^e$ sont les valeurs de $\{\sigma\}^e$ et $\{\varepsilon\}^e$ à l'état zéro.

d) Par application du théorème des travaux virtuels dans tous les éléments, et en imposant l'égalité des déplacements des noeuds communs aux différents éléments de la structure, on arrive à une équation du type : $\{R^*\} = \{R\} - \{F\}_p - \{F\}_{\varepsilon_0} - \{F\}_{\sigma_0} = [K]\{\delta\}$ (3) ; avec,

$[K]$ = matrice de raideur de la structure,
$\{R\}$ = vecteur de forces extérieures agissant sur les noeuds,
$\{F\}_p$ = vecteur des forces nodales dues aux charges réparties,
$\{F\}_{\varepsilon_0}$ = " " " " " " déformations initiales,
$\{F\}_{\sigma_0}$ = " " " " " " contraintes initiales,
présentes dès le départ de l'analyse.

Ces vecteurs et matrices sont obtenus par assemblage de ceux propres à chaque élément, dont les expresions sont :

$$\{F\}_p^e = -\int_e [N]^{e^T} \{p\}^e \, dVol.$$

$\{p\}^e$ = vecteurs des charges réparties

$$\{F\}_{\varepsilon_0}^e = -\int_e [B]^{e^T} [D]^e \{\varepsilon_0\}^e \, dVol.$$

$$\{F\}_{\sigma_0}^e = \int_e [B]^{e^T} \{\sigma_0\}^e \, dVol.$$

$$[k]^e = \int_e [B]^{e^T} [D]^e [B]^e \, dVol.$$

e) La résolution du système d'équations (3), permet d'obtenir les déplacements aux noeuds $\{\delta\}$, lesquels, moyennant les équations (1) et (2), donnent les contraintes et les déformations en tout point de la structure.

— Dans notre cas, la non-linéarité affecte seulement le comportement des matériaux. Ceux-ci sont supposés suivre une loi de la forme $\sigma = g(\varepsilon)$, 'g' étant une fonction non linéaire qui sera définie plus loin.

Par conséquent, la matrice $[D]^e$ n'est pas constante mais elle varie, pour chaque élément, en fonction de l'état de contraintes et de déformations à chaque moment.

Nous allons appliquer la charge par étapes (fig 3.1.a). A chaque étape, nous calculons les augmentations des déplacements, des déformations et des contraintes dues aux incréments des charges que l'on a appliqué.

Le problème étant non linéaire, la résolution de chaque étape doit se faire nécessairement de façon itérative (fig. 3.1 b) :

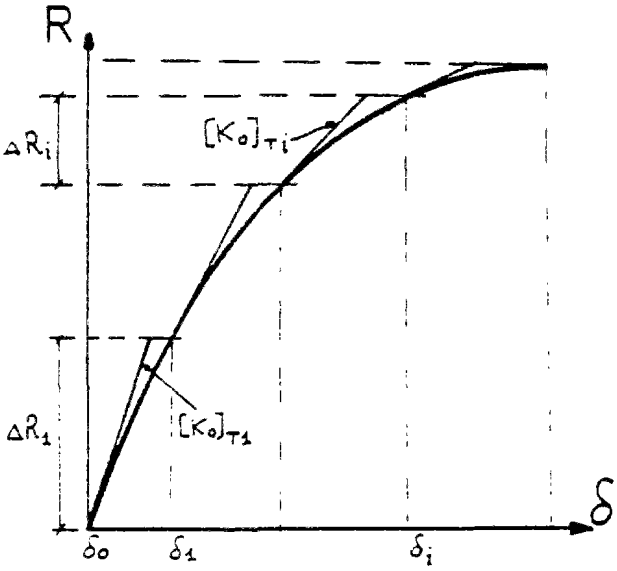


FIG. 3.1 a

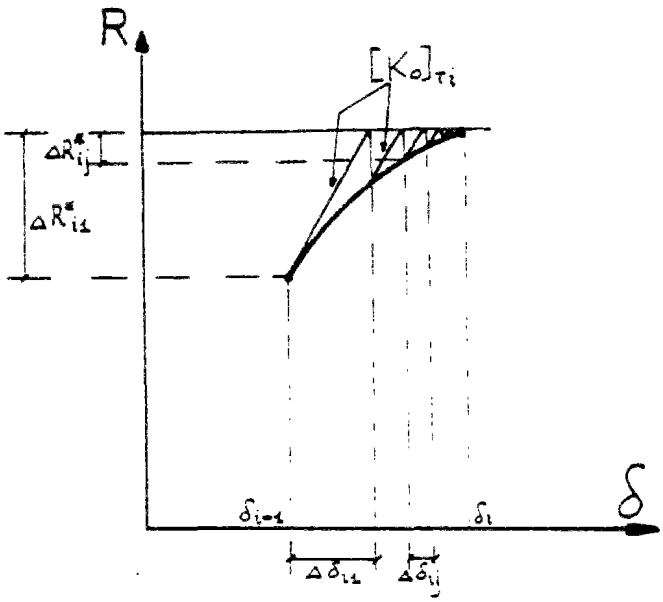


FIG. 3.1 b

Les équations (1), (2) et (3), servant à la résolution du problème, prennent pour l'étape 'i' et l'itération 'j' la forme suivante :

$$\{\Delta\varepsilon\}^e_{ij} = [B]^e \{\Delta\delta\}^e_{ij} \quad ; \qquad (1')$$

$$\{\Delta\sigma\}^e_{ij} = [D]^e_{ij} \{\Delta\varepsilon\}^e_{ij} \quad ; \qquad (2')$$

$$\{\Delta R^*\}_{ij} = [K]_{ij} \{\Delta\delta\}_{ij} \quad . \qquad (3')$$

Les matrices $[D]^e_{ij}$, et par conséquent $[K]_{ij} = \sum_e \int_e [B]^{eT} [D]^e_{ij} [B]^e \, dVol.$, ne sont pas modifiées au cours des itérations 'j' de chaque étape. Elles demeurent constantes et sont calculées, à partir des lois de comportement des matériaux $\sigma = g(\varepsilon)$, pour les valeurs finales de $\{\varepsilon\}^e_{i-1}$ et de $\{\sigma\}^e_{i-1}$ obtenues dans le calcul de l'étape précédente.

La diminution de la convergence que cela entraîne est contrecarrée par la réduction du temps de calcul que suppose l'obtention des matrices $[D]^e$ et $[K]$ une seule fois par étape. On a donc,

$$[D]^e_{ij} = [D_0]^e_{Ti} \qquad \forall j \qquad ;$$

$$[K]_{ij} = [K_0]_{Ti} \qquad \forall j \qquad ,$$

En vue d'améliorer la convergence, nous travaillons avec leurs expressions tangentes.

La démarche suivie pour la résolution d'une étape 'i' peut être schématisée comme suit : on résout d'abord $\{\Delta\delta\}_{i1} = [K_0]^{-1}_{Ti} \{\Delta R^*\}_{i1}$, où le vecteur $\{\Delta R^*\}_{i1}$ est égal à $\{\Delta R\}_i$, c'est à dire, au vecteur des forces extérieures appliquées aux noeuds à l'étape 'i' (nous ne considérons pas de charges réparties).

Les équations (1') et (2') nous permettent de calculer les $\{\Delta\varepsilon\}^e_{i1}$ et les $\{\Delta\sigma\}^e_{i1}$, ainsi que leurs valeurs finales : $\{\varepsilon\}^e_{i1} = \{\varepsilon\}^e_{i0} + \{\Delta\varepsilon\}^e_{i1}$ et $\{\sigma\}^e_{i1} = \{\sigma\}^e_{i0} + \{\Delta\sigma\}^e_{i1}$.

Mais, d'après les lois de comportement des matériaux $\sigma = g(\varepsilon)$, on trouve que pour le champ de déformations atteint, à chaque élément lui correspond un état de contraintes $\{\sigma^*\}^e_{i1} = g[\{\varepsilon\}^e_{i1}]$ différent de celui calculé. La différence $\{\sigma'\}^e_{i1} = \{\sigma\}^e_{i1} - \{\sigma^*\}^e_{i1}$ représente "les contraintes non équilibrées" qui ne peuvent pas être reprises par le matériau, sous le champ de déformations existant. Ces "contraintes non équilibrées" sont ensuite redistribuées élastiquement sur la structure pour rétablir l'équilibre :

$\{\Delta\delta\}_{i2} = [K_0]^{-1}_{Ti} \{\Delta R^*\}_{i2}$, où le vecteur $\{\Delta R^*\}_{i2}$ représente donc "les forces nodales non-équilibrées" qu'il faut réappliquer sur la structure. Son expression, fonction des contraintes non équilibrées $\{\sigma'\}^e_{i1}$ de la dernière itération, est la suivante :

$\{\Delta R^*\}_{i2} = \sum_e \int_e [B]^{eT} \{\sigma'\}^e_{i1} \, dVol.$ (elle est obtenue par application du principe des travaux virtuels).

Les itérations se poursuivent jusqu'à ce que les contraintes non équilibrées deviennent négligeables dans tous les éléments.

La méthode a été présentée par ZIENKIEWICZ, VALLIAPAN et KING (réf 16 et 17) sous le nom de "méthode de transfert de contraintes".

A) ETUDE BIDIMENSIONNELLE. -

3.3. - Idéalisation de la structure en éléments finis. -

3.3.1. - Type d'éléments. -

Nous allons considérer trois différents types d'éléments :

a) Eléments de béton. - Ils sont pris triangulaires et affectés d'une épaisseur constante. On va donc négliger la réduction de la section due à la présence des armatures.

Etant donné que l'étude est bidimensionnelle, la présence du bossage est prise en compte en supposant que la transmission de la précontrainte se répartit uniformément sur toute la surface de jonction bossage-hourdis (fig 3.2). Cette hypothèse est basée sur les résultats de LY (voir paragraphe 1.4).Son étude élastique plan, d'après la méthode de Schleeh, ainsi que la courbe des contraintes de cisaillement le long du plan de jonction bossage-hourdis, obtenue par son calcul par éléments finis, montrent que cette simplification est acceptable.

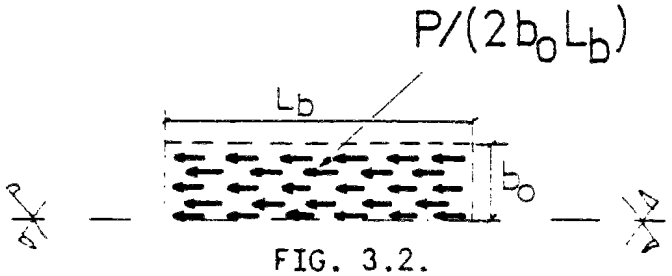


FIG. 3.2.

b) Eléments d'acier : Ils sont filiformes, c'est-à-dire, ils travaillent seulement dans le sens de la longueur de l'élément.

Puisque l'étude est plane, ils sont affectés d'une section qui est la somme de celles des aciers placés sur les faces supérieure et inférieure du hourdis.

Nous négligeons dans notre étude les déplacements relatifs acier - béton, dus à la perte de l'adhérence parfaite. L'acier et le béton ont donc des noeuds communs.

c) Eléments de jonction hourdis-parois latérales. - Il s'agit d'éléments à dimension géométrique nulle et dont la mission consiste à reproduire l'encastrement élastique hourdis-parois, en ce qui concerne les déplacements dans le sens de l'axe de la pièce, conformément aux considérations faites lors de l'exposition de la méthode des coupures.

3.3.2. - Convention de signes. -

Elle est montrée dans le schéma de la fig. 3.3.

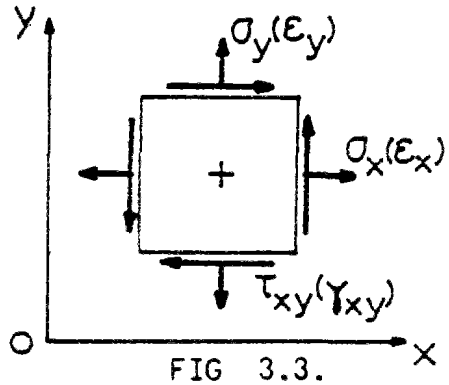


FIG 3.3.

3.3.3. - Eléments de béton (fig 3.4.)

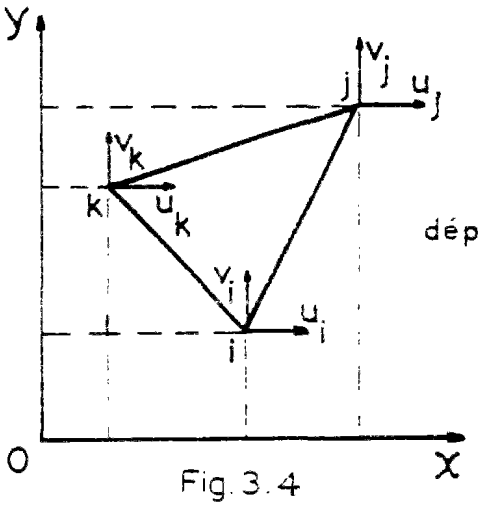


Fig. 3.4

— L'ordre de numérotation des noeuds i, j, k, doit respecter le sens trigonométrique.

— On a les vecteurs :

de déplacements : de contraintes : de déformations :

$$\underset{[6\times1]}{\{\delta\}^e} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \end{Bmatrix}^e \qquad \underset{[3\times1]}{\{\sigma\}^e} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^e \qquad \underset{[3\times1]}{\{\varepsilon\}^e} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}^e$$

— On va choisir une fonction-déplacement linéaire à l'intérieur de chaque élément :

$$u(x,y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$$

$$v(x,y) = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y$$

Les six coefficients sont obtenus par les six conditions :

$u_\ell = u(x_\ell, y_\ell)$, $v_\ell = v(x_\ell, y_\ell)$, $\ell = i, j, K$, ce qui donne les fonctions-déplacements suivantes :

$$u = \frac{1}{2\Delta}\left[(a_i + b_i x + c_i y)\,u_i + (a_j + b_j x + c_j y)\,u_j + (a_k + b_k x + c_k y)\,u_k\right]$$

$$v = \frac{1}{2\Delta}\left[(a_i + b_i x + c_i y)\,v_i + (a_j + b_j x + c_j y)\,v_j + (a_k + b_k x + c_k y)\,v_k\right]$$

avec : $a_i = x_j y_k - x_k y_j$ $\quad b_i = y_j - y_k$ $\quad c_i = x_k - x_j$

$a_j = x_k y_i - x_i y_k$ $\quad b_j = y_k - y_i$ $\quad c_j = x_i - x_k$

$a_k = x_i y_j - x_j y_i$ $\quad b_k = y_i - y_j$ $\quad c_k = x_j - x_i$

$$2\Delta = 2 \times \text{Surface élément} = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix}$$

Cette fonction-déplacement vérifie automatiquement la continuité des déplacements entre les éléments adjacents, puisqu'elle donne une variation linéaire des déplacements le long des bords du triangle.

— D'après les formules d'élasticité :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

et par conséquent, on a une <u>relation entre déformations et déplacements</u> dans l'élément, de la forme :

$$\underset{[3\times1]}{\{\varepsilon\}^e} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}^e = \underset{[3\times6]}{[B]^e}\,\underset{[6\times1]}{\{\delta\}^e} \quad \text{avec,} \quad [B]^e = \frac{1}{2\Delta}\begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{bmatrix}$$

La matrice $[B]^e$ est indépendante des coordonnées de chaque point. Il s'agit donc d'éléments à déformation constante.

— La <u>relation contraintes-déformations</u> est de la forme :

$\{\sigma\}^e = \{\sigma_0\}^e + [D]^e\{\varepsilon - \varepsilon_0\}^e$. L'expression de la matrice $[D]$ sera étudiée plus loin.

— La <u>matrice de raideur</u> de l'élément est :

$$\underset{[6\times6]}{[K]^e} = \int_e \underset{[6\times3]}{[B]^{e^T}} \underset{[3\times3]}{[D]^e} \underset{[3\times6]}{[B]^e} h\,dx\,dy = [B]^{e^T}[D]^e[B]^e h\,\Delta \;,$$

'h' étant l'épaisseur du hourdis et Δ la surface de l'élément.

— L'<u>équation d'équilibre</u> pour l'élément est :

$$\underset{[6\times1]}{\{F\}^e} = \underset{[6\times6]}{[K]^e} \underset{[6\times1]}{\{\delta\}^e}$$

où le vecteur des forces nodales $\{F\}^e$ est :

$$\{F\}^e = \begin{Bmatrix} F_{x_i} \\ F_{y_i} \\ F_{x_j} \\ F_{y_j} \\ F_{x_k} \\ F_{y_k} \end{Bmatrix}$$

3.3.4. - <u>Eléments d'acier (fig 3.5)</u>. -

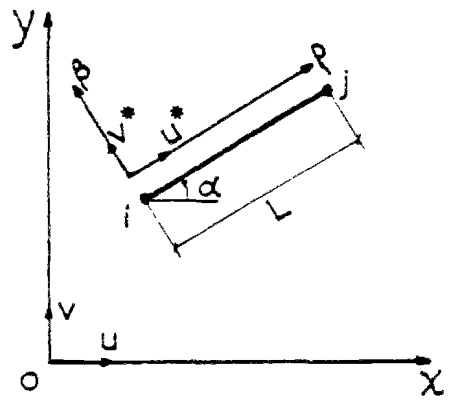


FIG 3.5

— Nous avons les vecteurs :

de <u>déplacements</u>

$$\underset{[4\times1]}{\{\delta\}^e} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix}^e \qquad \underset{[4\times1]}{\{\delta^*\}^e} = \begin{Bmatrix} u_i^* \\ v_i^* \\ u_j^* \\ v_j^* \end{Bmatrix}^e$$

(coord. globales) (coord. locales)

de <u>contraintes</u> : $\underset{[1\times1]}{\{\sigma^*\}^e}$,

et de <u>deformations</u> : $\underset{[1\times1]}{\{\varepsilon^*\}^e}$,

les deux en coordonnées locales.

— La <u>fonction-déplacement</u> est choisie linéaire à l'intérieur de l'élément. Exprimée en coordonnées locales, elle a la forme :

$$u^* = \gamma_1 + \gamma_2 \rho \qquad \text{avec les conditions limites :} \quad \begin{cases} \rho = 0 \rightarrow u^* = u_i^* \\ \rho = L \rightarrow u^* = u_j^* \end{cases}$$

Donc, $$u^* = (1-\rho/L)\,u_i^* + (\rho/L)\,u_j^*$$

— La <u>relation déplacements-déformations</u> en coordonnées locales est :

$$\underset{[1\times1]}{\{\varepsilon^*\}^e} = \left\{\frac{\partial u^*}{\partial \rho}\right\}^e = [-1/L\ ,\ 1/L]\begin{Bmatrix} u_i^* \\ u_j^* \end{Bmatrix}^e = \frac{1}{L}\underset{[1\times4]}{[-1,0,1,0]}\underset{[4\times1]}{\{\delta^*\}^e}$$

La matrice $[B^*]^e$ est donc : $\underset{[1\times4]}{[B^*]^e} = \frac{1}{L}[-1,\ 0,\ 1,0]$

— La <u>relation contraintes-déformations</u> sera étudiée plus loin .

— La <u>matrice de raideur</u> de l'élément en coordonnées locales est :

$$\underset{[4\times4]}{[K^*]^e} = \int_\ell [B^*]^{e^T}[D^*]^e[B^*]^e S_\phi\, d\rho = \underset{[4\times1]}{[B^*]^{e^T}}\underset{[1\times1]}{[D^*]^e}\underset{[1\times4]}{[B^*]^e} S_\phi L$$

S_ϕ étant la section des aciers.

— L'<u>équation d'équilibre</u> pour l'élément est

$$\underset{[4\times1]}{\{F^*\}^e} = \underset{[4\times4]}{[K^*]^e}\underset{[4\times1]}{\{\delta^*\}^e} \quad \text{avec} \quad \{F^*\}^e = \begin{Bmatrix} F_{xi}^* \\ F_{yi}^* \\ F_{xj}^* \\ F_{yj} \end{Bmatrix}$$

— Si l'on passe aux <u>coordonnées globales</u> :

$$\{F\}^e = \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{xj} \\ F_{yj} \end{Bmatrix}^e = [T]^{e^T}\{F^*\}^e \ , \text{ avec } \quad [T]^e = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}^e$$

$$\{\delta^*\}^e = [T]^e\{\delta\}^e .$$

Donc,

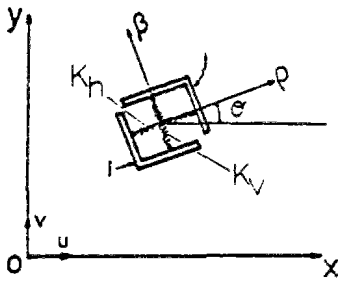
$$\{\varepsilon^*\}^e = [B^*]^e[T]^e\{\delta\}^e = [B]^e\{\delta\}^e \quad , \text{ où } [B]^e = \frac{1}{L}[-c,-s,c,s]$$

$$\{F\}^e = [T]^{e^T}\{F^*\}^e = [T]^{e^T}[K^*]^e[T]^e\{\delta\}^e = [K]^e\{\delta\}^e$$

avec

$$[K]^e = \frac{S_\phi\,[D^*]^e}{L}\begin{bmatrix} c^2 & sc & -c^2 & -sc \\ sc & s^2 & -sc & -s^2 \\ -c^2 & -sc & c^2 & sc \\ -sc & -s^2 & sc & s^2 \end{bmatrix} , \text{ et } \begin{cases} c = \cos\alpha \\ s = \sin\alpha \end{cases}$$

3.3.5. - Eléments liaison hourdis-parois latérales (fig 3.6)



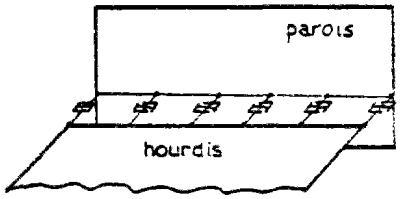


FIG 3.6

— Nous allons utiliser des "élements-ressort" semblables à ceux proposés par NGO & SCORDELIS (réf 14), pour reproduire le phénomène d'adhérence acier-béton. Dans notre cas, nous prenons comme constantes du ressort :

$K_v = 0$ (déplacements transversales libres)

K_h = un nombre suffisamment élevé pour garantir la quasi égalité des déplacements longitudinaux des deux côtés de la ligne de jonction, mais pas trop pour qu'il ne pose pas de problèmes numériques lors de la résolution du système d'équations. Pour les cas étudiés, la valeur 10^8 s'est avérée être acceptable.

L'angle θ vaut toujours zéro. On peut donc travailler en coordonnées globales :

$$\underset{[4\times1]}{\{\delta\}^e} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix}^e$$

$$\underset{[2\times1]}{\{\varepsilon\}^e} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_h \\ \varepsilon_v \end{Bmatrix}^e \quad ; \quad \underset{[2\times1]}{\{\sigma\}^e} = \begin{Bmatrix} \sigma_h \\ \sigma_v \end{Bmatrix}^e$$

ε_h et ε_v représentent des déplacements relatifs. Ils sont donc mesurés en cm.

σ_h et σ_v représentent les forces transmises par l'intermédiaire du ressort. Elles sont donc mesurées en kg.

— La relation entre déplacements des noeuds et "déformations" du ressort est :

$$\underset{[2\times1]}{\{\varepsilon\}^e} = \underset{[2\times4]}{[B]^e}\ \underset{[4\times1]}{\{\delta\}^e} \qquad \text{avec,} \quad [B]^e = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

— Celle entre les "déformations" du ressort et les forces transmises est :

$$\underset{[2\times1]}{\{\sigma\}^e} = \underset{[2\times2]}{[D]^e}\ \underset{[2\times1]}{\{\varepsilon\}^e} \qquad \text{avec,} \quad [D]^e = \begin{bmatrix} K_h & 0 \\ 0 & K_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^8 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

L'équation d'équilibre s'écrit :

$$\underset{[4\times1]}{\{F\}^e} = \begin{Bmatrix} F_{x_i} \\ F_{y_i} \\ F_{x_j} \\ F_{y_j} \end{Bmatrix} = \underset{[4\times4]}{[K]^e} \underset{[4\times1]}{\{\delta\}^e} \quad \text{avec,} \quad [K]^e = [B]^{e^T}[D]^e[B]^e = \begin{bmatrix} 10^8 & 0 & -10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -10^8 & 0 & 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.4. - Lois de comportement des matériaux. -

3.4.1. - Acier. -

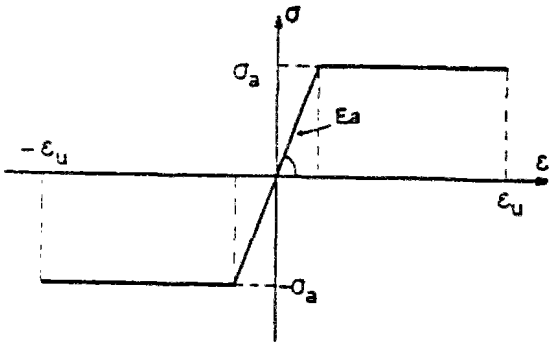


FIG 3.7

Les éléments d'acier sont supposés suivre une loi σ-ε uniaxiale-elasto-plastique parfaite (fig 3.7). Les comportements en traction et en compression sont identiques.

On a donc :

$$\sigma = f(\varepsilon) = \begin{cases} E_a * \varepsilon & \text{si } \varepsilon < \sigma_a / E_a \\ \sigma_a & \text{si } \varepsilon \geqslant \sigma_a / E_a \end{cases}$$

Et la loi incrémentale tangente :

$$\{\Delta\sigma\} = [D]_T \{\Delta\varepsilon\} \text{ , avec } [D]_T = \begin{cases} E_a & \text{si } \varepsilon < \sigma_a / E_a \\ 0 & \text{si } \varepsilon \geqslant \sigma_a / E_a \end{cases}$$

3.4.2. - Le béton. -

— C'est précisement dans l'adoption du modèle le plus approprié pour reproduire le comportement non linéaire du béton sous des sollicitations biaxiales, ainsi que les critères de rupture et de fissuration, que réside l'une des plus grandes difficultés du calcul de structures en béton armé par éléments finis.

Les premiers travaux sur ce sujet (NGO & SCORDELIS, réf 14) ont abordé le problème par le biais de la considération d'un comportement linéaire du béton, et de la prédifinition des fissures en position et longueur. Le maillage incorporait donc les fissures, en considérant des noeuds différents aux deux côtés.

Ensuite, de nombreux auteurs ont abordé le problème de façon plus complexe. Une étude bibliographique sur ce point est présentée dans l'annexe A .

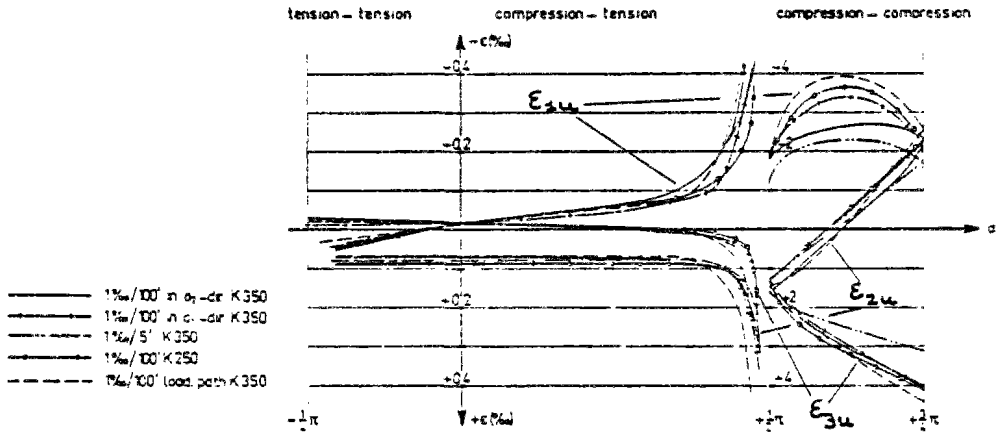
— Nous allons utiliser comme base de notre calcul, les résultats des essais effectués par KUPFER (réf 18 et 19). Ceux-ci ont été faits sur des éprouvettes carrées en forme de plaque, soumises à des sollicitations dans leur plan. Les dimensions des éprouvettes étaient 20 cm x 20 cm x 5 cm. Les charges étaient appliquées par l'intermédiaire des brosses d'acier, constituées par un grand nombre de petites barres en acier individuelles et assemblées de façon à constituer un paquet. Elles doivent être suffisamment souples pour pouvoir suivre les déformations de la pièce de façon indépendante, sans entraîner des contraintes transversales sur la surface d'application de la charge. En même temps, elles doivent avoir une résistence au flambement suffisante. Grâce à l'emploi des colles synthétiques modernes, des efforts de traction peuvent aussi s'appliquer.

La recherche de KUPFER portait sur toutes les combinaisons possibles de sollicitations biaxiales : bicompression (C-C), bitraction (T-T) et compression — traction (C-T). Des recherches postérieures, utilisant un système d'application de la charge similaire, ont abouti à des résultats semblables : NELISSEN (réf20); LIU et autres (réf 21); BUYUKOZTURK et autres (réf 22); CARINO et autres (réf 23); TASUJI et autres (réf 24).

— Toutes ces recherches ont été effectués sur des essais où la charge a été appliquée proportionnellement (c'est-à-dire, en maintenant constant pendant l'essai le rapport entre les contraintes appliquées sur les deux côtés de l'éprouvette).

Bien que plusieurs auteurs aient confirmé la faible dépendance des valeurs des contraintes de rupture vis-à-vis de la façon d'appliquer la charge, cela n'est pas forcément vrai en ce qui concerne les valeurs des déformations ultimes, et donc, les lois $\sigma - \varepsilon$, qui sont très sensibles à la qualité du béton, à la vitesse l'application de la charge et au chemin de chargement suivi.

On a donc une certaine imprécission quand nous adoptons des diagrammes σ-ε obtenus sous charge proportionnelle, pour reproduire le comportement réel du béton dans les zones où, par suite des phénomènes de non linéarité, se produisent d'importantes variations aussi bien dans les rapports entre les contraintes principales que dans leurs directions.



The influence of the way of loading on the maximum deformations under biaxial loading.

FIG 3.8 (NELISSEN, (réf. 20))

— A titre d'exemple, nous présentons les courbes obtenues par NELISSEN pour étudier l'influence de différents paramètres sur les valeurs des déformations (fig 3.8) et des contraintes (fig 3.9) en rupture, d'une éprouvette soumise à de différents états de sollicitation biaxiale.

La fig 3.8 donne les valeurs des déformations ultimes dans les trois directions principales $\varepsilon_{1u}, \varepsilon_{2u}, \varepsilon_{3u}$, en fonction de $\alpha = \text{arc.tg.}(-\sigma_I/\sigma_{II})$, (α = 0 correspond à une sollicitation de traction uniaxiale).

La fig 3.9 donne les valeurs des résistances ultimes, rapportées à la résistance sur prisme (σ_p).

Les facteurs dont l'influence a été étudiée sont :

a) qualité du béton : 250 et 350 bars (à 28 jours d'âge) ;

b) la vitesse d'application de la charge, avec deux taux : $d\varepsilon/dt = 1‰/100'$ et $d\varepsilon/dt = 1‰/5'$;

c) le chemin de chargement : tous les essais ont été réalisés avec une augmentation proportionnelle de la charge, sauf un dans lequel on a suivi un chemin de chargement arbitraire ;

d) la direction dans laquelle on a maintenu le taux de déformation constant ($d\varepsilon/dt = k$) pendant l'essai.

Les figures montrent que l'influence de tous ces facteurs sur les contraintes en rupture n'est pas trop importante. Par contre, les déformations en sont très affectées, en particulier ε_{1u}, dans la région de bicompression.

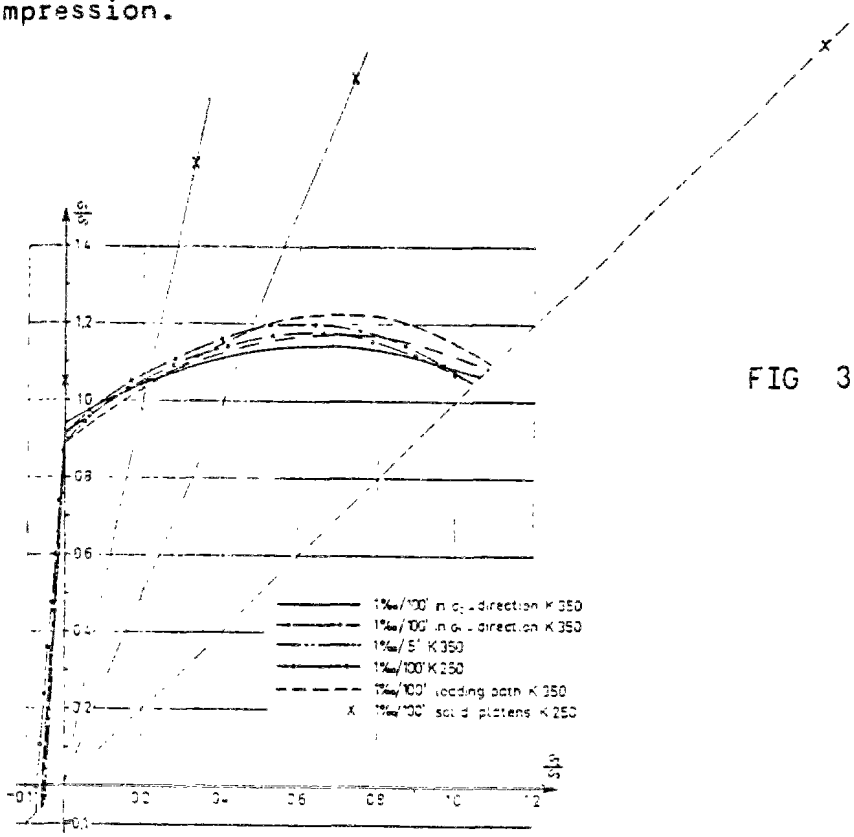


FIG 3.9 (NELISSEN, réf20)

The influence of the way of loading on the ultimate load under biaxial loading.

— Les essais de KUPFER portaient sur trois bétons de qualité de différente. Dans ce qui suit, nous allons nous limiter aux résultats concernant les bétons de qualité moyenne ($\beta_p \simeq 300$ bars).

3.4.2.1. - Résistance du béton. -

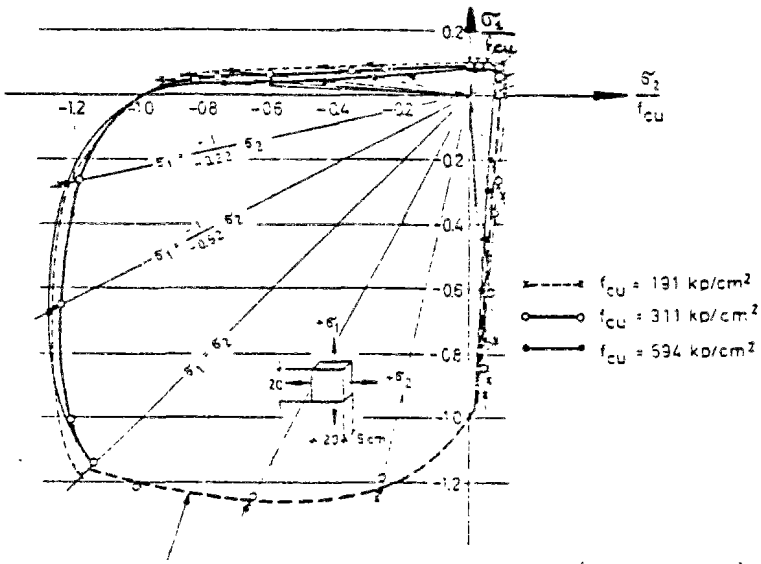
— Nous présentons dans la fig 3.10, les courbes des résistances ultimes obtenues par KUPFER, pour n'importe quelle combinaison des contraintes principales.

Les courbes sont présentées de façon adimensionnelle, avec les résistances rapportées à la résistance β_p sur prisme.

Dans la fig 3.11, nous présentons les domaines C-T et T-T de façon plus détaillée.

— Dans la zone T-T, les résistances obtenues s'avèrent indépendantes du rapport de contraintes, et sensiblement égales à sa valeur uniaxiale.

Nous voulons cependant noter que de récentes recherches (réf 24) ont abouti à des résultats différents : elles ont obtenu une augmentation de la résistance à bitraction par rapport aux valeurs uniaxiales.



éd.1

FIG 3.10 (KUPFER, (réf.19))

Nous allons supposer une résistance à la traction, constante dans le domaine T-T, et donnée par la formule (réf.19) :

$$\boxed{\frac{\sigma_{Tu}}{\beta_p} = \frac{0.64}{\sqrt[4]{\beta_p}}}$$

— Dans le domaine C-C, la parabole proposée par KUPFER, s'accorde assez bien aux résultats des essais (fig 3.10) :

$$\left(\frac{\sigma_1}{\beta_p} + \frac{\sigma_2}{\beta_p}\right)^2 - \frac{\sigma_1}{\beta_p} - 3.65\,\frac{\sigma_2}{\beta_p} = 0 \qquad (1) \quad ;$$

avec σ_1 et σ_2 données en valeur absolue et $\sigma_1 > \sigma_2$.

L'équation (1) peut être exprimée en fonction du rapport α entre les deux contraintes principales :

si nous prenons

$$\boxed{\sigma_2 = \sigma_1\,\alpha \quad (0 < \alpha < 1)} \quad ,$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{\beta_p}\right)^2 (1+\alpha)^2 = \frac{\sigma_1}{\beta_p}\,(1 + 3.65\alpha) \longrightarrow \boxed{\begin{array}{l} \sigma_{1u} = \dfrac{-(1+3.65\,\alpha)}{(1+\alpha)^2}\,\beta_p \\ \sigma_{2u} = \sigma_{1u}\cdot\alpha \end{array}}$$

— Dans le domaine C-T, existent deux sous-zones de comportement différent, selon que les tractions ou les compressions soient dominantes. La séparation des deux zones peut être établie pour une valeur de $\alpha = \frac{\text{traction}}{\text{compression}}$ égale à 1/15 environ (voir annexe A).

a) Pour $|\alpha| > 1/15$, nous prenons une droite qui passe par le point correspondant à l'essai uniaxial :

$$\boxed{\begin{array}{ll} \alpha = \dfrac{\sigma_2\,(\text{traction})}{\sigma_1\,(\text{compression})} & ;\ -1/15 > \alpha > -\infty \\[2ex] \sigma_{1u} = \dfrac{0.64\,\beta_p}{\alpha\sqrt[3]{\beta_p} - 0.366} < 0 & ;\ \sigma_{2u} = \sigma_{1u}\cdot\alpha > 0 \end{array}}$$

b) Pour $|\alpha| < 1/15$, nous utilisons une parabole analogue à celle du domaine C-C, mais avec un coefficient 'm' qui, au lieu de valoir 3.65, est ajusté en imposant que pour $|\alpha| = 1/15$, la parabole raccorde la droite utilisée dans l'autre sous-zone :

Ainsi donc, $$\frac{\sigma_1}{\beta_p} = \frac{-(1+m\alpha)}{(1+\alpha)^2} = \frac{0.64}{-\sqrt[3]{\beta_p}/15 - 0.366} \longrightarrow m = \frac{15\sqrt[3]{\beta_p} - 43.055}{\sqrt[3]{\beta_p} + 5.492}$$

et,

$$\boxed{\begin{array}{ll} \sigma_{1u} = -\dfrac{(1+m\alpha)}{(1+\alpha)^2}\,\beta_p < 0 & \\ & ;\ -1/15 < \alpha < 0 \\ \sigma_{2u} = \sigma_{1u}\cdot\alpha > 0 & \end{array}}$$

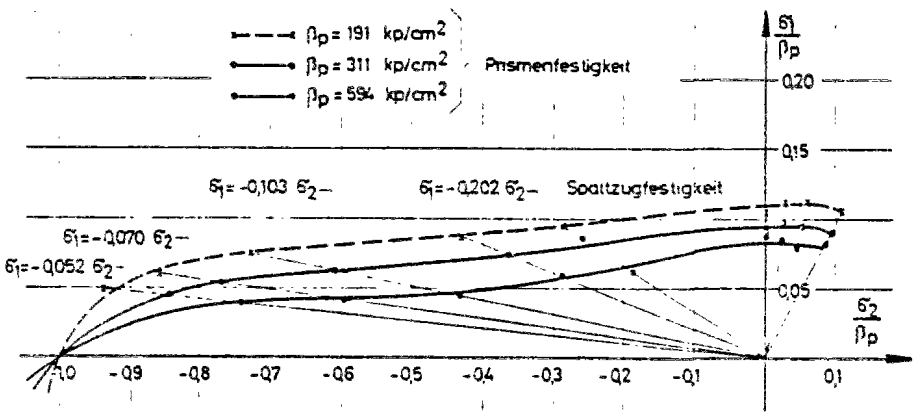


FIG 3.11. KUPFER (réf. 19)

3.4.2.2. - Valeurs des déformations ultimes. -

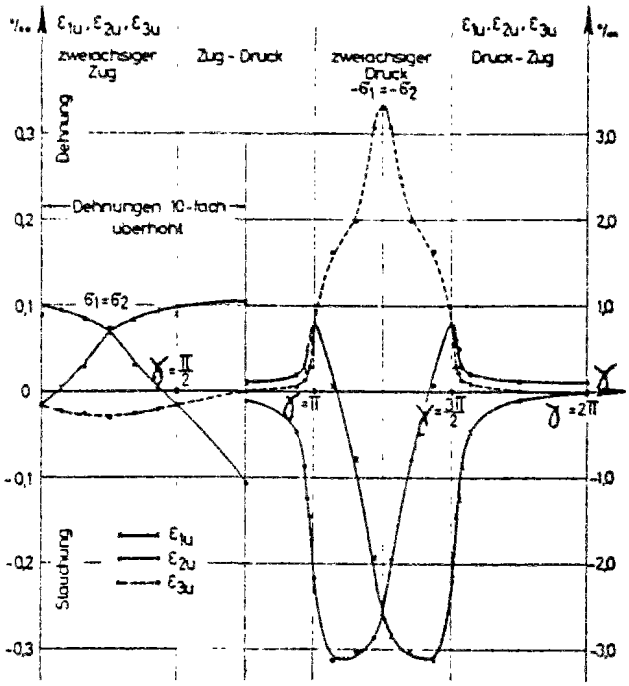


FIG 3.12.

Les valeurs des déformations ultimes dans les trois directions principales ε_{1u} , ε_{2u} et ε_{3u} sont montrées dans la fig 3.12, en fonction de $\gamma = \text{arc.tg.}(1/\alpha)$ avec $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$.
Ces valeurs correspondent aux essais de KUPFER.

3.4.2.3. - Les lois contraintes-déformations. -

Les fig 3.13, 3.14 et 3.15 montrent les courbes expérimentales de KUPFER qui vont servir de base à notre modèle. Celui-ci comporte une formulation analytique des lois $\sigma - \varepsilon$, englobant toutes les combinaisons possibles de contraintes T-T, T-C et C-C, qui est fonction du rapport α entre les contraintes principales.

Cette formulation est complétement déterminée en fonction de certains paramètres dont la définition est simple, à savoir :

- Les modules E_0 et ν_0 , tirés des essais de compression uniaxiale du béton.
- Les contraintes σ_{iu} en rupture, dont l'expression analytique a été présentée dans le paragraphe 3.4.2.1., en fonction de la résistance en compression uniaxiale sur prisme β_p , et du rapport α des contraintes principales.

- Les déformations en rupture ε_{iu} , qui ont été rapportées dans le paragraphe 3.4.2.2, en fonction de α .

Dans les fig 3.13 à 3.15, les courbes fines correspondent aux résultats expérimentales de KUPFER, et celles en gros traits, au modèle analytique proposé, qui est basé dans les travaux de LIU (réf. 25) et CEDOLIN (réf. 26).

A) Domaine T-T. -

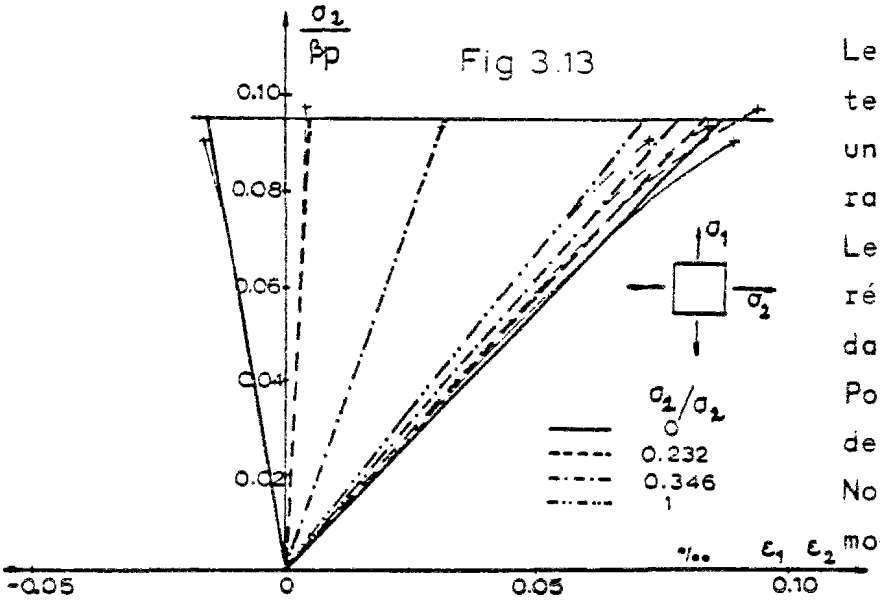


Fig 3.13

Le béton présente un comportement quasiment linéaire avec une courbure négligeable, apparaissant peu avant la rupture. Les essais ont aussi donné une réduction d'environ 10 %, dans la valeur du module de Poisson, par rapport aux essais de compression.
Nous allons donc utiliser un modèle isotrope et élastique qui peut être défini au moyen des lois classiques de l'élasticité, lesquelles , rapportées aux contraintes principales, ont la forme :

$$\sigma_1 = \frac{E_0}{1-(\nu_0^T)^2}\left[\varepsilon_1 + \nu_0^T \varepsilon_2\right]$$

$$\sigma_2 = \frac{E_0}{1-(\nu_0^T)^2}\left[\varepsilon_2 + \nu_0^T \varepsilon_1\right] \qquad [I]$$

avec $\nu_0^T = 0.9\,\nu_0$, ν_0 étant le module de Poisson obtenu dans l'essai de compression uniaxiale.

B) Domaine C-C. -

Dans cette zone, les courbes $\sigma - \varepsilon$ ont une allure semblable à celle des courbes obtenues dans l'essai de compression uniaxiale : forte courbure par rapport à la tangente à l'origine, et tangente pratiquement horizontale à la rupture.

Nous allons donc utiliser des expressions analytiques analogues à celle proposée par SAENZ (réf 27) pour le cas uniaxial :

$\sigma_1 = \dfrac{A + B\varepsilon_1}{1 + C\varepsilon_1 + D\varepsilon_1^2}$ (1), les paramètres A, B, C et D sont obtenus en se donnant les conditions suivantes :

a) Pour $\varepsilon_1 = 0 \longrightarrow \sigma_1 = 0$

b) Pour $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1u} \longrightarrow \sigma_1 = \sigma_{1u}$

c) Pour $\varepsilon_1 = 0 \longrightarrow (d\sigma_1/d\varepsilon_1) = E_0^*$

d) Pour $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1u} \longrightarrow (d\sigma_1/d\varepsilon_1) = 0$

En effectuant les calculs, nous arrivons à

$$A = 0 \; ; \; B = E_0^* \; ; \; D = \frac{1}{\varepsilon_{1u}^2} \quad \text{et} \quad C = \frac{1}{\varepsilon_{1u}}\left[\frac{E_0^*}{E_s} - 2\right], \text{ avec } E_s = \frac{\sigma_{1u}}{\varepsilon_{1u}}$$

E_0^* est la pente à l'origine de la courbe, et sa valeur peut être obtenue à partir des lois élastiques :

si l'on suppose un état de compressions biaxiales, tel que :

$\sigma_2 = \sigma_1 \alpha$; avec $\sigma_1 < \sigma_2 < 0$ $\quad |\sigma_1| > |\sigma_2|$ $\quad 0 < \alpha < 1$

nous obtenons pour la courbe $\sigma_1 - \varepsilon_1$:

$$\varepsilon_1 = (\sigma_1 - \nu_0 \sigma_2)/E_0 = \sigma_1(1 - \nu_0\alpha)/E_0 \qquad \sigma_1 = \frac{E_0\,\varepsilon_1}{(1-\nu_0\alpha)} \qquad E_0^* = \frac{E_0}{1-\nu_0\alpha}$$

et pour la courbe $\sigma_1 - \varepsilon_2$:

$$\varepsilon_2 = (\sigma_2 - \nu_0 \sigma_1)/E_0 = \sigma_1(\alpha - \nu_0)/E_0 \qquad \sigma_1 = \frac{E_0\,\varepsilon_2}{(\alpha-\nu_0)} \qquad E_0^* = \frac{E_0}{\alpha-\nu_0}$$

Si nous remplaçons les paramètres A, B, C, D de l'expression (1) par les valeurs que l'on vient de calculer, nous aboutissons aux lois suivantes :

$$\sigma_1 = \frac{E_0\,\varepsilon_1}{(1-\nu_0\alpha)\left[1 + \left[\frac{E_0}{(1-\nu_0\alpha)}\,\frac{\varepsilon_{1u}}{\sigma_{1u}} - 2\right]\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1u}}\right) + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1u}}\right)^2\right]} \qquad [\text{II-a}]$$

$$\sigma_1 = \frac{E_0\,\varepsilon_2}{(\alpha-\nu_0)\left[1 + \left[\frac{E_0}{(\alpha-\nu_0)}\,\frac{\varepsilon_{2u}}{\sigma_{1u}} - 2\right]\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{2u}}\right) + \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{2u}}\right)^2\right]} \qquad [\text{II-b}]$$

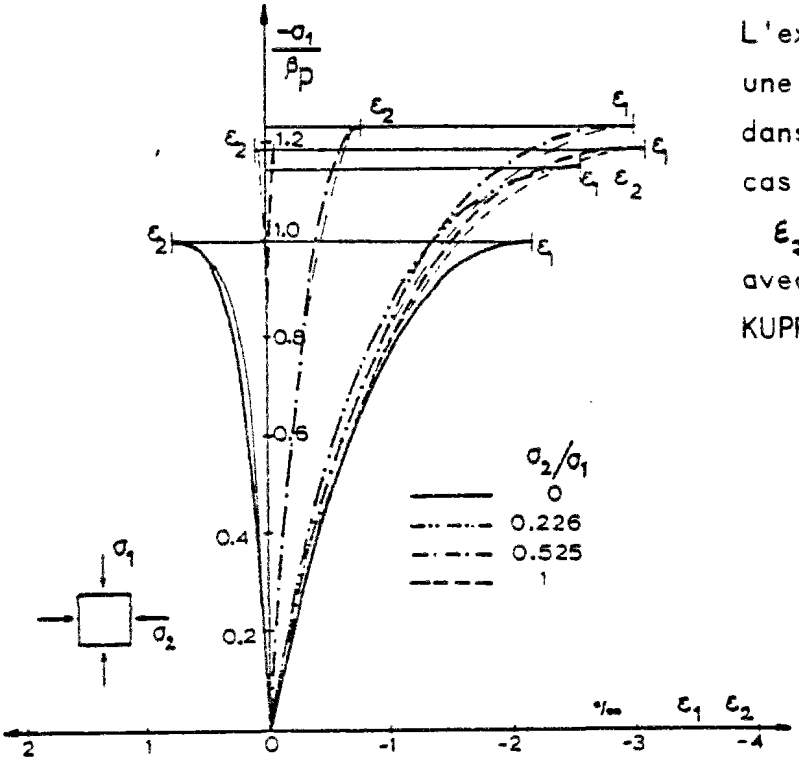


FIG 3.14

L'expression (II-b) présente une singularité mathématique dans le cas $\alpha = \nu_0$. Pour ce cas nous prenons une loi $\varepsilon_2 = 0$ qui s'accorde bien avec la courbe obtenue par KUPFER pour $\alpha \simeq 0.2$

C) Domaine C-T. -

— Dans cette zone, les courbes montrent une transition graduelle entre la linéarité propre du domaine T-T et la non linéarité de celui des bicompressions. La transition se fait en fonction du rapport α entre les tractions et les compressions.

— Les courbes expérimentales montrent que les diagrammes sont encore non-linéaires, mais que l'hypothèse de pente nulle à la rupture n'est plus valable. Par conséquent, nous allons réduire d'un le nombre de paramètres de l'équation (1) de SAENZ:

$$\sigma_1 = \frac{A + B\,\varepsilon_1}{1 + C\,\varepsilon_1}$$ (2) et ne pas imposer la condition d) (pente nulle à la rupture).

Les valeurs des paramètres sont maintenant :

$$A = 0 \quad ; \quad B = E_0^* \quad \text{et} \quad C = \frac{1}{\varepsilon_{1u}}\left[\frac{E_0^*}{E_s} - 1\right]$$ (3), et les expressions définitives

des lois $\sigma - \varepsilon$:

$$\sigma_1 = \frac{E_0\,\varepsilon_1}{(1-\nu_0\alpha)\left[1+\left[\frac{E_0}{(1-\nu_0\alpha)}\,\frac{\varepsilon_{1u}}{\sigma_{1u}}-1\right]\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1u}}\right)\right]} \qquad [III-a]$$

$$\sigma_1 = \frac{E_0\,\varepsilon_2}{(\alpha-\nu_0)\left[1+\left[\frac{E_0}{(\alpha-\nu_0)}\,\frac{\varepsilon_{2u}}{\sigma_{1u}}-1\right]\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{2u}}\right)\right]} \qquad [III-b]$$

avec $\underset{(compr.)}{\sigma_1} < 0 < \underset{(tract.)}{\sigma_2}$; $\sigma_2 = \sigma_1\alpha$ $\quad \underset{(tract.\ simple)}{-\infty} < \alpha < \underset{(compr.\ simple)}{0}$

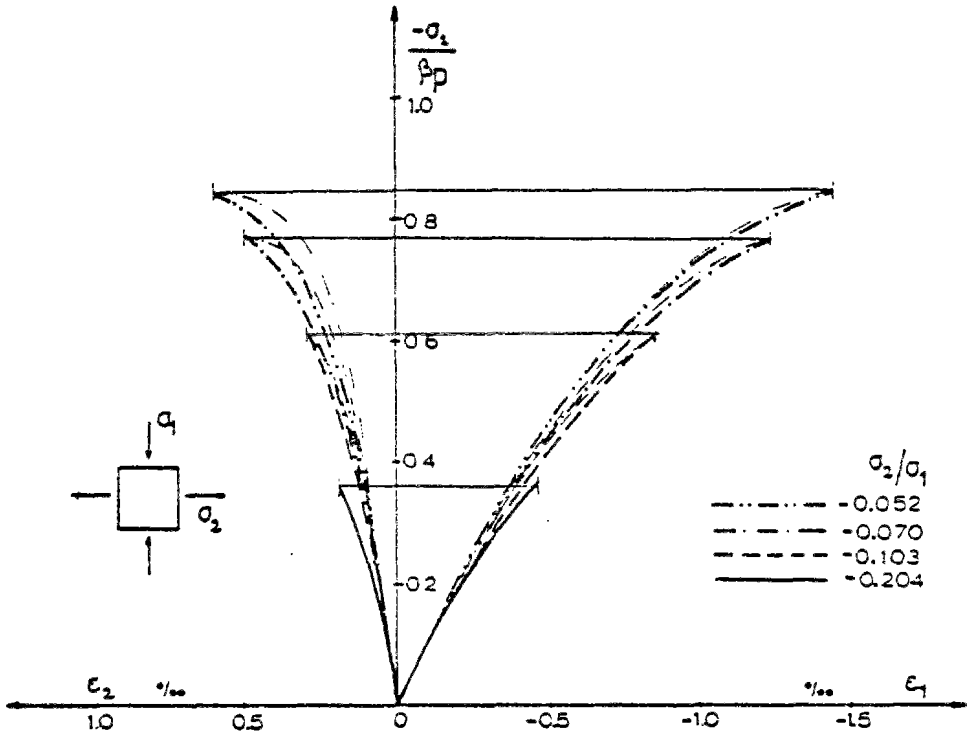


FIG 3.15

— Ces expressions, valables dans la zone moyenne du domaine C-T, doivent être raccordées à celles utilisées dans les domaines C-C et C-T, de façon à garantir une transition graduelle dans la formulation, condition nécessaire pour que la convergence de la résolution numérique soit bonne.

— La comparaison des expressions (II) et (III) montre qu'une transition graduelle peut être facilement obtenue moyennant un coefficient γ , fonction de α , qui varie linéairement entre $\alpha = 0$ (compression uniaxiale) et une valeur de α pour laquelle on peut considérer que le comportement du béton n'est plus le propre des compressions. Nous avons fixé cette valeur, de façon arbitraire, $\alpha = -0.10$.

La formulation pour la zone $-0.1 < \alpha < 0$ est donc :

$$\sigma_1 = \frac{E_0\,\varepsilon_1}{(1-\nu_0\alpha)\left[1+\left[\frac{E_0}{(1-\nu_0\alpha)}\frac{\varepsilon_{1u}}{\sigma_{1u}}-1-\gamma(\alpha)\right]\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1u}}\right)+\gamma(\alpha)\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1u}}\right)^2\right]} \qquad [IV-a]$$

et

$$\sigma_1 = \frac{E_0\,\varepsilon_2}{(\alpha-\nu_0)\left[1+\left[\frac{E_0}{(\alpha-\nu_0)}\frac{\varepsilon_{2u}}{\sigma_{1u}}-1-\gamma(\alpha)\right]\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{2u}}\right)+\gamma(\alpha)\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{2u}}\right)^2\right]} \qquad [IV-b]$$

avec, $\gamma(\alpha) = 1 + 10\alpha$

Ces expressions peuvent englober les (II) et (III) si nous définissons la fonction $\gamma(\alpha)$, comme suit :

$\gamma(\alpha) = 1$	en C-C
$\gamma(\alpha) = 1 + 10\alpha$	en C-T, avec $0 > \alpha > -0.1$
$\gamma(\alpha) = 0$	en C-T, avec $-0.1 > \alpha$

— Quant au raccord avec la zone T-T, il suffit de remarquer que la valeur du coefficient C dans l'expression (2) est : $C = \frac{1}{\varepsilon_{1u}}\left[\frac{E_0^*}{E_s} - 1\right]$.
Si $E_0^* = E_s$, C vaut 0 et la loi $\sigma_1 - \varepsilon_1$ devient linéaire : $\sigma_1 = B\,\varepsilon_1$.
La valeur de α pour laquelle C = 0, est obtenue en résolvant l'équation $E_0^* = \frac{E_0}{(1-\nu_0\alpha)} = \frac{\sigma_{1u}}{\varepsilon_{1u}} = E_s$ (où σ_{1u} et ε_{1u} sont fonction de α).
Au delà de cette valeur de α, les expressions approchées de σ_{1u} et ε_{1u} en fonction de α , peuvent donner une valeur de C négative, situation sans aucun sens physique qu'il convient d'éviter.

Pour le béton que nous considérons, et à partir des courbes de KUPFER, nous obtenons que pour $\alpha = -0.5$, $E_s \simeq 0.8\,E_0$. Ce qui suppose la quasi-linéarité de la courbe.

Nous allons donc nous arrêter là, et supposer que les expressions (IV) ne sont applicables que pour $\alpha > -0.5$, au delà de quoi (tractions encore plus fortes), le comportement du béton est linéaire et élastique, régi par les équations (I), propres au domaine T-T, assurant en même temps une transition graduelle des valeurs de ν_0 :

$$\nu_0^{CT} = \nu_0(0.9 - 0.05/\alpha)$$

où ν_0 = mod. poisson à compression

et $-\infty < \alpha < -0.5$
(traction uniaxiale)

3.4.3. - Obtention de la matrice $[D]_T$ pour le béton non fissuré

Pour l'application de la méthode des éléments finis, telle qu'elle a été décrite dans les paragraphe 3.2 et 3.3, il nous faut obtenir l'expression de la matrice $[D]$ tangente, qui met en rapport les augmentations des contraintes et des déformations à chaque étape du chargement.

3.4.3.1. - Hypothèses. -

Voici un résumé des hypothèses adoptées en vue de la définition de la matrice $[D]_T$:

a) On suppose un état de contraintes plan dans le béton ($\sigma_z = 0$).

b) On suppose que le comportement du béton n'est pas affecté par la présence des armatures, et que par conséquent on peut utiliser les résultats des essais réalisés sur un béton non armé.

c) On va se rapporter aux lois de comportement du béton sous charge biaxiale, fournies par les essais de KUPFER pour un béton de qualité moyenne ($\beta_p \simeq 310$ bars), dont une formulation analytique a été présentée dans le paragraphe précédent.

d) Il est hors de notre propos de prendre en compte des phénomènes à long terme (fluage, retrait, relaxation des aciers).

e) On suppose la charge appliquée de façon monotone croissante, sans cycles de chargement et déchargement. Dans les zones où certains déchargements se produisent (si l'on considère par exemple l'existance d'une petite précompression initiale dans le béton, auquelle on va superposer le phénomène de la diffusion locale de la précontrainte), nous supposons qu'ils suivent la même loi $\sigma-\varepsilon$ que pour les chargements. Cela n'est pas erroné puisque, dans ces cas, on reste encore en zone linéaire.

f) Les déformations tangentes sont supposées indépendantes des contraintes principales, et vice versa.

g) On suppose l'existance d'un potentiel élastique, c'est-à-dire, que le travail effectué par les forces internes au cours des déformations élastiques se transforme complétement en énergie potentielle emmagasinée dans le corps.

h) On suppose un comportement isotrope normalement au plan des contraintes principales, de même que pour le cas d'une sollicitation uniaxiale on suppose une isotropie par rapport aux directions non sollicitées.

i) On approxime les lois σ-ε non linéaires de façon linéaire à l'intérieur de chaque étape d'augmentation de la charge. La loi de déformation incrémentielle utilisée est obtenue tangentiellement à partir de l'état σ-ε préalable, en supposant que les caractéristiques du matériau demeurent constantes dans l'intervalle.

j) Le comportement non linéaire du béton sous un état déterminé de contraintes biaxiales, entraîne une anisotropie dans la réponse du matériau face à une nouvelle sollicitation, anisotropie qui varie au cours du chargement et dont les directions principales d'anisotropie correspondent aux contraintes principales à chaque moment.

3.4.3.2. - Définition de $[D^*]_T$ en coordonnées locales. -

— Le problème posé est donc celui de la définition, pour un état de contraintes et de déformations donné, d'une relation incrémentielle entre σ et ε qui soit linéaire, élastique et anisotrope selon les deux directions principales et qui représente approximativement le comportement du béton pendant l'augmentation de la charge dans la nouvelle étape.

— Cette expression doit avoir la forme générale (LEKHNITSKII, réf 28) :

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix}$$

a_{ij} sont les coefficients de déformation du matériau (en nombre de 12)

$$\text{et } d\varepsilon_3 = a_{41}\, d\sigma_1 + a_{42}\, d\sigma_2 + a_{43}\, d\tau_{12} \qquad (1)$$

Si l'on suppose l'existance d'un potentiel élastique $(\bar{V})$:

$d\sigma_1 = \dfrac{\partial(d\bar{V})}{\partial(d\varepsilon_1)}$ et $d\sigma_2 = \dfrac{\partial(d\bar{V})}{\partial(d\varepsilon_2)}$, et par différentiation

par rapport à $d\varepsilon_2$ et $d\varepsilon_1$:

$$\frac{\partial^2(d\bar{V})}{\partial(d\varepsilon_1)\partial(d\varepsilon_2)} = \frac{\partial^2(d\bar{V})}{\partial(d\varepsilon_2)\partial(d\varepsilon_1)} \longrightarrow \frac{\partial(d\sigma_1)}{\partial(d\varepsilon_2)} = \frac{\partial(d\sigma_2)}{\partial(d\varepsilon_1)}$$

cela implique l'égalité des termes A_{12} et A_{21} de la matrice (A_{ij}) :

$\{d\sigma\} = [A_{ij}]\{d\varepsilon\}$. En opérant de la même sorte avec les autres termes, on arrive à établir $A_{ij} = A_{ji} \longrightarrow [A_{ij}]$ est symétrique et pas inversion de cette matrice : $[a_{ij}] = [A_{ij}]^{-1}$ est aussi symétrique. Il nous reste donc :

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} \qquad (2)$$

$$d\varepsilon_3 = a_{41}\,d\sigma_1 + a_{42}\,d\sigma_2 + a_{43}\,d\tau_{12}$$ (9 constantes à déterminer)

— Comme les essais que l'on a à notre disposition ne nous permettent pas d'établir ces 9 constantes, il nous faut faire quelques hypothèses :

L'hypothèse f) de 3.4.3.1 entraîne l'élimination de trois des constantes : $a_{13} = a_{23} = a_{43} = 0$

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{12} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} \qquad (3)$$

(6 constantes à déterminer)

$$d\varepsilon_3 = a_{41}\,d\sigma_1 + a_{42}\,d\sigma_2$$

Ces coefficients de déformation peuvent être exprimés en fonction des coefficients classiques, les modules de Poisson et de déformation :

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} \qquad (4)$$

$$d\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{13}}{E_1} d\sigma_1 - \frac{\nu_{23}}{E_2} d\sigma_2 \qquad (4')$$

avec, $\boxed{\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}}$ (5)

équations classiques des matériaux présentant à chaque point trois plans octogonaux de symétrie élastique, matériaux dits orthotropes.

— Les essais de KUPFER vont nous permettre, moyennant quelques hypothèses supplémentaires, d'évaluer les ν_{ij} et les E_{ij} . Mais ils ne fournissent aucune information sur le module G_{12} de déformation transversale. Faute de recherches expérimentales sur ce point, la plupart des auteurs conviennent d'admettre que G_{12} peut être rapporté aux autres coefficients du matériau, si l'on suppose que le comportement sous un effort de cisaillement pur peut être élargi aux autres états de sollicitation. Cette supposition dans le cas des matériaux isotropes nous amène à adopter une expression de la forme : $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$. Par une pareille démarche, nous obtenons pour les matériaux orthotropes :

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$ ou bien, ce qui revient au même :

$$G_{12} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2 + 2\nu_{12} E_2} = \frac{E_1}{(\nu_{12}/\nu_{21}) + 1 + 2\nu_{12}} \qquad (6)$$

Les équations 5) et 6), nous permettent d'écrire la relation incrémentale (4) en fonction E_1, ν_{12} et ν_{21} seulement :

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_1} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{12} & 0 \\ -\nu_{12} & \nu_{12}/\nu_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + 2\nu_{12} + \nu_{12}/\nu_{21} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} \qquad (7)$$

et par inversion de la matrice :

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = [D^*]_T \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \qquad \text{avec} \quad [D^*]_T = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \begin{bmatrix} 1 & \nu_{21} & 0 \\ \nu_{21} & \nu_{21}/\nu_{12} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{1+2\nu_{12}+\dfrac{\nu_{12}}{\nu_{21}}} \end{bmatrix}$$

(8)

—Pour la zone à comportement linéaire, la matrice $[D^*]_T$ prend la forme propre aux matériaux isotropes :

$$[D^*]_T = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1-\nu^2}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \qquad (9)$$

avec

$E = E_0$ et $\nu = \begin{cases} 0.9\ \nu_0 & \text{, pour le béton en bitraction} \\ \nu_0(0.9-0.05/\alpha) & \text{, pour le béton en C-T et } -\infty < \alpha < -0.5 \end{cases}$

— Dans la zone à comportement non-linéaire, les modules E_i et ν_{ij} doivent être obtenus à partir des lois $\sigma-\varepsilon$, dont l'expression analytique a été obtenue dans le paragraphe 3.4.2.3 (expressions (IV-a) et (IV-b)).

Les équations (4), (4') et (5) donnent :

$$d\varepsilon_1 = \frac{d\sigma_1 - \nu_{12}\, d\sigma_2}{E_1}$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{d\sigma_2 - \nu_{21}\, d\sigma_1}{E_2} \qquad \text{, avec} \quad \nu_{12} E_2 = \nu_{21} E_1$$

$$d\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{13}}{E_1} d\sigma_1 - \frac{\nu_{23}}{E_2} d\sigma_2$$

L'hypothèse h) du paragraphe précédent, nous permet de réduire de deux le nombre d'inconnues : $\nu_{13} = \nu_{12}$ et $\nu_{23} = \nu_{21}$, l'équation (4') devient alors :

$$d\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{12}}{E_1}(d\sigma_1 + d\sigma_2) = -\frac{\nu_{21}}{E_2}(d\sigma_1 + d\sigma_2),$$

et en supposant une augmentation proportionnelle de la charge :

$$\sigma_2 = \sigma_1 \alpha \longrightarrow d\sigma_2 = \alpha\, d\sigma_1 \quad , donc$$

$$d\varepsilon_1 = \frac{(1-\nu_{12}\alpha)}{E_1} d\sigma_1 \quad ; \quad d\varepsilon_2 = \frac{(\alpha - \nu_{21})}{E_2} d\sigma_1 \quad ;$$

$$d\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{12}(1+\alpha)}{E_1} d\sigma_1 = -\frac{\nu_{21}(1+\alpha)}{E_2} d\sigma_1 \quad ,$$

ou bien, ce qui revient au même :

$$\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = C_1 = \frac{E_1}{(1-\nu_{12}\alpha)} \qquad \text{et} \qquad \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_2} = C_2 = \frac{E_2}{\alpha - \nu_{21}}$$

$$\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_3} = C_3 = -\frac{E_1}{(1+\alpha)\nu_{12}} \qquad \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_3} = C_3 = -\frac{E_2}{(1+\alpha)\nu_{21}}$$

et en résolvant les deux systèmes d'équations :

$$\boxed{E_1^T = -\frac{C_1\, C_3(1+\alpha)}{C_1\alpha - C_3(1+\alpha)} \qquad \nu_{12}^T = \frac{C_1}{C_1\alpha - C_3(1+\alpha)}} \quad \text{et} \quad \boxed{E_2^T = -\frac{\alpha\, C_2\, C_3(1+\alpha)}{C_2 - C_3(1+\alpha)} \qquad \nu_{21}^T = \frac{C_2\,\alpha}{C_2 - C_3(1+\alpha)}} \quad (10)$$

expressions qui vérifient la condition 5) : $\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} = -\frac{1}{C_3(1+\alpha)}$

Les coefficients C_1, C_2 et C_3 sont fonction du rapport α entre les contraintes principales et de l'état de chargement (défini par les valeurs des déformations ε_i). Ils sont obtenus à partir des approximations analytiques des lois expérimentales $\sigma_1 - \varepsilon_i$ de KUPFER (expressions (IV) du paragraphe 3.4.2.3) :

$$\boxed{\begin{array}{l} \underset{i=1,2,3}{C_i} = \dfrac{d\sigma_1}{d\varepsilon_i} = \dfrac{E_i^*\left(1-(\varepsilon_i/\varepsilon_{iu})^2\gamma(\alpha)\right)}{\left[1+\left(\dfrac{E_i^*\varepsilon_{iu}}{\sigma_{1u}}-1-\gamma(\alpha)\right)\left(\dfrac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iu}}\right)+\gamma(\alpha)\left(\dfrac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iu}}\right)^2\right]^2} \\ \text{avec} \quad E_1^* = \dfrac{E_0}{1-\nu_0\alpha} \quad , \quad E_2^* = \dfrac{E_0}{\alpha-\nu_0} \quad \text{et} \quad E_3^* = -\dfrac{E_0}{(1+\alpha)\nu_0} \end{array}} \qquad (11)$$

Dans le cas $\alpha = \nu_0$, pour lequel l'expression 11) donne $C_2 = \infty$, les valeurs de ν_{21}^T et E_2^T sont pris comme suit :

$$\boxed{\nu_{21}^T = \alpha = \nu_0 \qquad E_2^T = \frac{E_1^T\alpha}{\nu_{12}^T} = \frac{E_1^T\nu_0}{\nu_{12}^T}} \qquad (12)$$

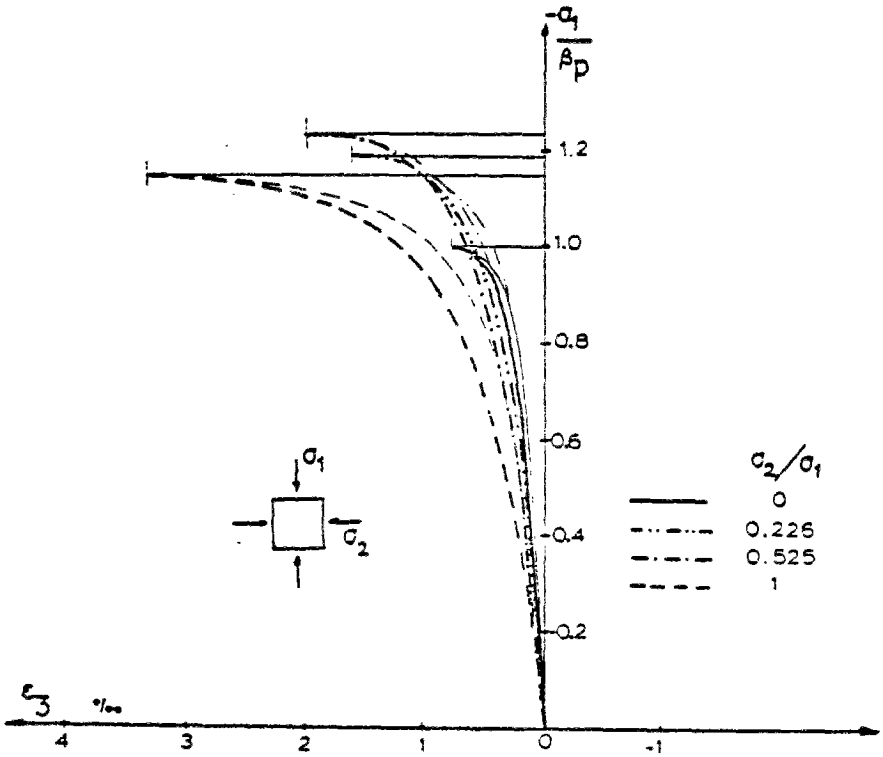


FIG 3.16

(les courbes fines correspondent aux essais KUPFER)

Dans le cas $\alpha = 0$, pour le calcul de ν_{21}^T et E_2^T nous prenons $\alpha = 0.01$, ce qui nous évitera des problèmes numériques.

L'autre possibilité de singularité numérique, $\alpha = -1$, ne se produit pas puisque, tel qu'on la déjà vu, pour $\alpha < -0.5$, le béton est supposé linéaire, élastique et isotrope, et par conséquent la matrice $[D^*]_T$ est donnée par l'expression (9).

— Dans la fig 3.16 nous présentons l'approximation analytique des lois $\sigma_1 - \varepsilon_3$. Ici, la concordance avec les résultats expérimentaux est moins bonne que celle qu'on avait pour $\sigma_1 - \varepsilon_1$ et $\sigma_1 - \varepsilon_3$ (voir fig.3.14 et 3.15). D'autre part, l'hypothèse h), qui nous a permis d'établir $\nu_{12} = \nu_{13}$ et $\nu_{21} = \nu_{23}$, est assez discutable. Or, étant donné que les conditions $\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = c_1$ et $\frac{d\sigma_2}{d\varepsilon_2} = c_2$, ont été imposées dans l'obtention des coefficients E_{ij}^T et ν_{ij}^T , nous pouvons être certains que les valeurs obtenues d'après (10), introduites dans le modèle incrémental (8), assurent que celui-ci représente parfaitement le "comportement tangent du béton dans son plan, sous une augmentation proportionnelle de la sollicitation biaxiale", que nous considérons défini par les courbes expérimentales de KUPFER.

3.4.3.3. - <u>Expression de $[D]_T$ en coordonnées globales</u>. -

Nous venons donc d'obtenir une expression qui relie les augmentations des déformations et des contraintes principales, expression qui doit être rapportée au système de référence globale.

Nous avons donc, $\{\Delta\sigma_{princ.}\}^e = [D^*]_T^e \{\Delta\varepsilon_{princ.}\}^e$,
avec $[D^*]_T$ donnée par les expressions (8) à (12).

Si nous passons au système de référence globale :

$$\{\Delta\sigma\}^e = [T^*]^e \{\Delta\sigma_{princ}\}^e = [T^*]^e [D^*]_T^e \{\Delta\varepsilon_{princ}\}^e = [T^*]^e [D^*]_T^e [T^*]^{eT} \{\Delta\varepsilon\}^e$$

$[T^*]^e$ étant :
$$\begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2-s^2 \end{bmatrix}$$

$c = \cos\alpha'$; $s = \sin\alpha'$

et α' l'inclinaison des directions principales : $\alpha' = \frac{1}{2}$ arc. tg $\left[2\tau_{xy}/(\sigma_x - \sigma_y)\right]$.

Toutes ces matrices sont différentes pour chaque élément et fonctions de l'état de contraintes à chaque instant.

3.4.4. - Obtention de la matrice $[D]_T$ pour le béton fissuré. -

— A partir du moment où des tractions inadmissibles apparaissent à l'intérieur d'un élément, celui-ci est supposé traversé par une série de fissures parallèles, dont la direction est normale à celle de la contrainte principale de traction au moment précis de la fissuration.

L'application adéquate d'une telle méthode exige deux conditions :

a) Un bon découpage de la maille dans les zones où les fissures apparaissent. Cela ne découle pas seulement du fait que l'on suppose la fissuration étendue à tout l'élément, mais aussi par suite des fortes variations et redistributions de contraintes, qui se produisent aux alentours des zones fissurées.

b) Effectuer de petits incréments de la charge au moment de la fissuration. Etant donné que la direction des fissures est fixée selon les directions des contraintes principales de l'élément au moment où la fissure est décelée, c'est-à-dire, à la fin d'une étape de chargement, si nous appliquons de fortes augmentations des charges, nous risquons ainsi d'obtenir une contrainte principale de traction dont la direction s'éloigne de celle qu'on aurait sous la charge pour laquelle la fissure apparaît réellement.

— Si au moment de la fissuration σ_I est la traction principale la plus grande, l'élément est désormais considéré comme décomposé en une série de fibres ou de petites colonnes dans la direction β (celle de σ_{II}) (fig 3.17), sans liaison entre elles. L'élément aura, donc, une raideur nulle dans la direction α' normale aux fissures. Dans l'autre sens β, le béton travaillera sous une sollicitation uniaxiale.

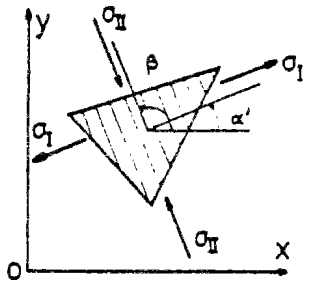


FIG 3.17

La matrice $[D^*]$ tangente, rapportée aux coordonnées locales, aura la forme :

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_I \\ d\sigma_{II} \\ d\tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_t & 0 \\ 0 & 0 & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_I \\ d\varepsilon_{II} \\ d\gamma \end{Bmatrix}$$

, la matrice $[T]$ qui assure le passage aux coordonnées globales sera celle du paragraphe précédent, mais calculée en prenant α' égal à l'angle de la direction normale aux fissures.

E_t sera le module d'élasticité tangent du béton, sous une sollicitation uniaxiale de compression, si $\varepsilon_{II} < 0$, ou de traction, si $\varepsilon_{II} > 0$.

Si au cours d'une augmentation postèrieure de la charge, la déformation ε_{II} dépasse la limite à traction, l'élément sera désormais considéré fissuré dans les deux directions, avec une matrice $[D^*]_T = 0$

— Le coefficient 'A' de la matrice $[D^*]_T$ essaye de donner au modèle une certaine rigidité vis-à-vis des déformations transversales, pour ainsi tenir compte de l'engrénement entre le béton des deux côtés de la fissure. Faute de données sur ce point, nous avons adopté arbitrairement l'expression proposé par CEDOLIN (réf 29), laquelle fait décroître la valeur de 'A' au fur et à mesure que la déformation de l'élément dans le sens normal aux fissures augmente :

$$A = 0.15\, E_0 [1 - \varepsilon_I / 0.004]$$

— Dans la modèle proposé, les fissures ne sont pas considérées comme localisées, mais étendues sur tout l'élément. Mais, par le biais du mécanisme d'adhérence, une partie de la sollicitation prise par l'acier (lequel prend tout l'effort aux points fissurés) est transmise au béton dans la zone entre fissures (fig 3.18). Au fur et à mesure de l'accroissement des déformations, les fissures se multiplient et le béton collabore de moins en moins.

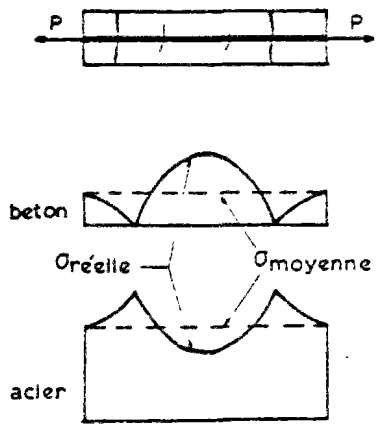


FIG. 3.18

Pour représenter convenablement la déformabilité réelle des éléments

fissurés, il faut donc tenir compte de la participation du béton tendu en phase fissurée. Le comportement moyen d'un élément fissuré peut être obtenu de manière approchée en considérant une courbe de déchargement progressif qui tend vers zéro à la plastification de l'acier tendu (fig 3.19) :

$$\sigma_I = \sigma_{IR} \frac{(\varepsilon_f - \varepsilon)^2}{(\varepsilon_f - \varepsilon_{IR})^2},$$

où σ_{IR} et ε_{IR} sont les les valeurs au moment de la fissuration, qui doivent être gardées par le programme, et $\varepsilon_f = \frac{f_a}{E_a}$.

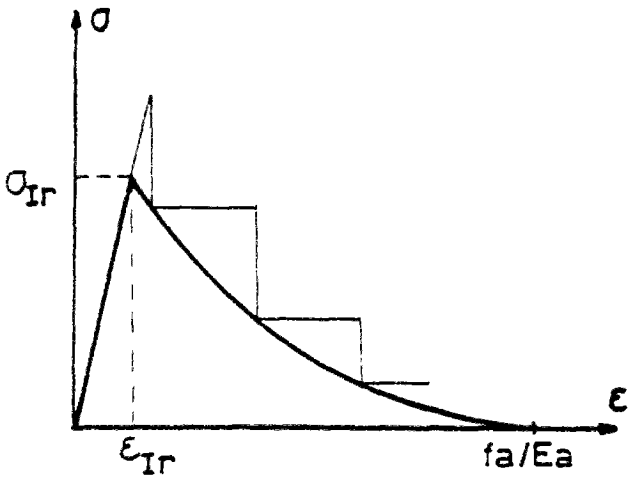


FIG 3.19

La prise en compte de la collaboration du béton entre fissures intervient seulement au moment de l'évaluation des contraintes non-équilibrées. La matrice $[D^*]^T$ fissurée, n'est pas modifiée. Elle reste avec une raideur nulle face aux déformations en direction normale aux fissures : $\frac{d\sigma_I}{d\varepsilon_I} = 0$

—Quoique le programme ne considère pas de déchargements, les fortes redistributions des contraintes entraînées par la fissuration, peuvent produire des fermetures des fissures dans certaines zones très localisées. Le programme utilise toujours pour le déchargement le même diagramme $\sigma - \varepsilon$ de la fig 3.19.

Les imprécisions que cela comporte ne sont pas importantes puisque, lors de l'exécution, nous avons constaté que très peu d'éléments en sont affectés et qu'il s'agit toujours des éléments qui venaient de se fissurer.

3.5. - La matrice de raideur $[K]_T$ globale.-

3.5.1. - Obtention

—Une fois que les matrices $[D]_T^e$ des différents éléments sont connues, les matrices de raideur $[k]_T^e$ peuvent être évaluées à partir des expressions montrées dans les paragraphes 3.3.3, 3.3.4, et 3.3.5.

L'équation d'équilibre globale de la structure a la forme: $\{\Delta R^{*}\} = [K]_T \{\Delta \delta\}$

avec

$$\{\Delta R^{*}\} = \begin{Bmatrix} \Delta F_{x1} \\ \Delta F_{y1} \\ \vdots \\ \Delta F_{xNp} \\ \Delta F_{yNp} \end{Bmatrix}, \quad \text{et} \quad \{\Delta \delta\} = \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta v_1 \\ \vdots \\ \Delta u_{Np} \\ \Delta v_{Np} \end{Bmatrix},$$

N_p = nombre total de noeuds.

La matrice de raideur globale $[K]_T$ est obtenue par assemblage des matrices de raideur des différents éléments : $[K_{lm}]_T = \sum_e [k_{lm}]_T^e$.

Le terme k_{lm} existera seulement au cas où l = m ou bien si 'l' et 'm' sont des points nodaux adjacents, c'est-à-dire, reliés par l'intermédiaire d'un élément commun aux deux noeuds.

— Quand la matrice de raideur globale est obtenue, on effectue les modifications nécessaires pour tenir compte des conditions aux limites : Si le déplacement u_j (ou v_j) d'un certain point nodal 'j' est considéré comme fixe et égal à une certaine valeur α , il faut modifier le terme diagonal de la ligne de la matrice raideur qui correspond au déplacement contraint, en le multipliant par une quantité très grande :

$K_{ll} = K_{ll} * 10^{20}$, l = 2 j - 1 (ou 2 j), et modifier en même temps le terme du vecteur charges : $F_l = F_l \cdot 10^{20} \cdot \alpha$, de façon à obtenir au moment de la résolution du système,

$$u_j \ (\text{ou } v_j) = \alpha.$$

3.5.2. - Stockage de la matrice $[K]_T$ globale. -

— La matrice $[K]_T$ est de dimension très élevée : $4\,N_p^{\,2}$, mais une grande partie de ses termes sont nuls :

$$\begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta F_{x1} \\ \Delta F_{y1} \end{Bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{Bmatrix} \Delta F_{xNp} \\ \Delta F_{yNp} \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K'_{11} & \cdots & K'_{1Np} \\ \vdots & & \vdots \\ K'_{Np1} & \cdots & K'_{NpNp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta v_1 \end{Bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{Bmatrix} \Delta u_{Np} \\ \Delta v_{Np} \end{Bmatrix} \end{Bmatrix}$$

les K'_{ij} sont des sous matrices de dimensions 2 x 2 qui sont nulles pour tous le i,j tels que $i \neq j$, et tels que i et j ne sont pas reliés par un élément commun.

— Il est donc possible d'éviter le stockage de tous les éléments de la matrice $[K]_T$.

Si l'on suppose un nombre maximal de 29 points nodaux connectés à un point donné, nous avons un maximum de 2 x (29 + 1) = 60 termes qui peuvent être non nuls pour chaque ligne de la matrice $[K]_T$, laquelle peut donc être emmagasinnée comme une matrice SM (2 x N_p, 60). Cette matrice, étant trop grande pour être conservée dans la mémoire centrale de l'ordinateur, est stockée par lignes dans le disque :
SM (1,1) ... SM (1,60), SM (2,1) .... SM (2,60)..... SM ($2N_p$,1) ... SM ($2N_p$,60).

—Une matrice de localisation ISP (NP,30) s'avère donc nécessaire pour le repérage des colonnes de $[K]_T$, qui correspondent aux termes stockés dans SM. Cette matrice, nous l'avons défini comme suit :

ISP (n,k) = j, implique que les éléments stockées dans

SM (m,l), avec $\begin{cases} m = 2n - 1,\ 2n \\ l = 2k - 1,\ 2k \end{cases}$

correspondent aux éléments K (p, q), avec $\begin{cases} p = 2n - 1,\ 2n \\ q = 2j - 1,\ j \end{cases}$, de la matrice de raideur de la structure.

Pour k = 1, nous faisons toujours j = n ⟶ ISP (n,1) = n. Par conséquent, les termes diagonaux ont une localisation immédiate :

K (2n - 1, 2n - 1) ⟶ SM (2n - 1, 1)
K (2n - 1, 2n) ⟶ SM (2n - 1, 2)
K (2n, 2n - 1) ⟶ SM (2n, 1)
K (2n, 2n) ⟶ SM (2n,2)

termes diagonaux

3.6. - Résolution du système

Nous avons mis au point une méthode de résolution basée dans la méthode dite des "matrices clairesemées"(voir ZIENKIEWICZ, réf 15), qui ne constitue qu'une variante de la méthode d'élimination de Gauss aux cas où le matrice de raideur est stockée sous forme compacte, c'est-à-dire, sans les éléments nuls.

Cela nous permet, grâce à l'utilisation d'une matrice de localisation, de ne travailler qu'avec les sous matrices non-nulles, ce qui entraîne une réduction importante du temps de calcul et, surtout, du nombre de

variables stockées, condition indispensable étant donnée la petite capacité de l'ordinateur utilisé. Il faut remarquer que la méthode d'élimination crée de sous matrices non nulles à des emplacements où précédemment il n'y avait que des zéros. La méthode entraîne donc des modifications au sein des matrices SM et ISP avec l'apparition de liaisons entre des noeuds qui ne sont pas reliés par le découpage. Il en découle le besoin de prévoir la possibilité d'une forte augmentation du nombre de connections d'un certain noeud, en fixant la limite avec une marge suffisante (on a établi un maximum de 29 noeuds connectés à chaque noeud).

L'impossibilité de garder en mémoire centrale les matrices SM et ISP nous a obligé à mettre au point une méthode, nous permettant de mener d'une façon simple le contrôle sur le grand nombre de transferts qui ont lieu entre la mémoire centrale de l'ordinateur et les périphériques. Cela est fait par l'intermédiaire des subroutines 'BWR' et 'SWO' (voir les 'listings' dans les annexes)

3.7. - Calcul des contraintes. -

3.7.1. - Evalutation des forces non équilibrées. -

— Une fois que le système d'équations est résolu, nous connaissons les $\{\Delta\delta\}$ correspondants à l'augmentation de la charge que l'on vient d'appliquer.

A partir des $\{\Delta\delta\}$, il est possible d'obtenir les augmentations des contraintes et des déformations : $\{\Delta\sigma\}^e = [D]_T^e [B]^e \{\Delta\delta\}^e$ et $\{\Delta\varepsilon\}^e = [B]^e \{\Delta\delta\}^e$ dans tous les éléments, augmentations qui sont accumulées sur les vecteurs de contraintes et de déformations totales $\{\sigma\}^e = \{\sigma\}^e + \{\Delta\sigma\}^e$ et $\{\varepsilon\}^e = \{\varepsilon\}^e + \{\Delta\varepsilon\}^e$.

— C'est maintenant que, à partir des diagrammes théoriques adoptés pour reproduire les comportements des matériaux, nous pouvons obtenir les contraintes théoriques $\{\sigma^*\}^e$ qui régnent dans l'élément quand les déformations de celui-ci sont $\{\varepsilon\}^e$. Par différence entre les contraintes calculées et les théoriques, nous obtenons les contraintes "non-équilibrées" : $\{\sigma'\}^e = \{\sigma\}^e - \{\sigma^*\}^e$, lesquelles entraînent l'apparition

des forces nodales "non-équilibrées" : $\{F_n\}^e = \int_e [B]^{eT} \{\sigma'\}^e dvol.$
qui doivent être réappliquées sur la structure, tant que les valeurs des $\{\sigma'\}^e$ ne soient pas négligeables.

Nous avons utilisé comme critère de convergence que les contraintes non équilibrées ne dépassent pas un certain pourcentage des contraintes théoriques $\{\sigma^*\}^e$.

—Une fois que les contraintes $\{\sigma'\}^e$ sont évaluées, les contraintes théoriques $\{\sigma^*\}^e$ deviennent les contraintes de calcul de l'élément, c'est-à-dire, on fait : $\{\sigma\}^e = \{\sigma^*\}^e$.

—Dans les éléments d'acier, le calcul des $\{F_n\}$ ne pose guère de problèmes :

$$\{F_n\}^e = [T]^{eT} \{F_n^*\}^e = [T]^{eT} [B]^{eT} \{\sigma'\}^e \cdot S_\phi \cdot L$$

et en opérant

$$\{F_n\}^e = \begin{Bmatrix} -\cos\alpha \\ -\sin\alpha \\ \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{Bmatrix} \{\sigma'\}^e S_\phi$$

, α étant l'inclinaison de l'élément (fig 3.5), et $\{\sigma'\}^e$ étant calculée par rapport au système de référence local.

—Dans les éléments de béton, nous trouvons quelques problèmes :

$$\{F_n\}^e = e \Delta [B]^{eT} \{\sigma'\}^e \quad \text{avec,}$$

$\{\sigma'\}^e = \{\sigma\}^e - [T^*]^e \{\sigma^*\}^e$ où $\{\sigma'\}^e$ est rapportée au système globale, $\{\sigma^*\}^e$ au système locale, c'est-à-dire, aux directions principales, et $[T^*]^e$ est celle du paragraphe 3.4.3.3.

$\{\sigma^*\}^e$ est le vecteur des contraintes principapes théoriques qui correspondent, d'après les lois de comportement du béton choisies, aux déformations principales calculées : $\{\varepsilon^*\}^e = [T]^e \{\varepsilon\}^e$

Si les éléments sont fissurés, la direction de fissuration et sa normale se substituent aux directions principales.

—Un problème numérique surgit au moment du calcul des contraintes principales théoriques correspondantes aux déformations principales obtenues par le calcul. Le problème réside dans le fait que les courbes

$\sigma - \varepsilon$ sont fonction du rapport α entre les deux contraintes principales. Or, celles-ci sont précisément les valeurs à obtenir. Il s'avère donc indispensable l'utilisation d'une méthode itérative :

On commence pour une première approximation $\alpha = \alpha_0 = \frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_1}$, $\bar{\sigma}_1$ et $\bar{\sigma}_2$ étant les valeurs des contraintes principales obtenues d'après le calcul. Si α_0 est en dehors de la zone linéaire, il faut itérer :

- Si $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < 0$, on est dans la zone de bicompression : $0.2 < \alpha < 1$
- Si $\varepsilon_1 < 0 < \varepsilon_2$, on est dans le domaine : $-0.5 < \alpha < 0.2$

Les itérations sont effectuées en cherchant une solution de l'équation :

$\psi(\alpha) = 0$, avec $\psi(\alpha) = \sigma_1(\varepsilon_1, \alpha) - \sigma_1(\varepsilon_2, \alpha)$. Les $\sigma_1(\varepsilon_i, \alpha)_{i=1,2}$ sont obtenues d'après (IV-a) et (IV-b).

Au cas où l'on ne parvient pas à trouver une solution dans l'intervalle correspondant, l'élément sera considéré comme :

a) Soit fissuré en direction normale à la plus grande traction, si le béton est en bitraction ou en traction-compression avec $-\infty < \alpha_0 < -1/15$.

b) Soit rompu par compression, si le béton est en bicompression ou en compression-traction avec $-1/15 < \alpha_0 < 0$

La valeur - 1/15 est établie d'après la figure 8 de l'annexe A

3.7.2. - <u>Evaluation des contraintes aux noeuds des éléments</u>. -

Pour le type d'éléments utilisés, les contraintes et les déformations ont été supposées constantes à l'intérieur de l'élément. Nous pouvons les affecter, de façon approchée, au centre de gravité de l'élément.

L'évaluation des contraintes aux noeuds doit se faire à partir de celles des éléments dont le noeud en question fait partie. Nous allons calculer la moyenne en pondérant différemment la contribution des divers éléments adjacents, en fonction de sa forme géométrique (réf 30) :

$$\sigma_x^{(\ell)} = \frac{1}{S_x} \sum_n \frac{a_{(n)}}{a_{(n)} + b_{(n)}} \sigma_{x(n)}$$

$$\sigma_y^{(\ell)} = \frac{1}{S_y} \sum_n \frac{b_{(n)}}{a_{(n)} + b_{(n)}} \sigma_{y(n)}$$

$$\tau_{xy}^{(\ell)} = \frac{1}{N} \sum_n \tau_{xy(n)}$$

avec

$$S_x = \sum_n \frac{a_{(n)}}{a_{(n)} + b_{(n)}}$$

$$S_y = \sum_n \frac{b_{(n)}}{a_{(n)} + b_{(n)}}$$

$$a_{(n)} = \left| x_i^{(n)} + x_j^{(n)} + x_k^{(n)} - 3 x_\ell^{(n)} \right|$$

$$b_{(n)} = \left| y_i^{(n)} + y_j^{(n)} + y_k^{(n)} - 3 y_\ell^{(n)} \right|$$

où la $\sum$ s'étend aux N éléments connectés au point nodal 'l'.

3.8. - <u>Programme de calcul bidimensionnel</u>. -

Un programme de calcul par ordinateur 'ELF' a été mis au point dans le cadre de cette étude. Ce programme permet un découpage en 600 éléments, avec un maximum de 400 points nodaux, et 100 points nodaux aux mouvements empêchés. Du fait de la petite capacité (28 K accessibles) de l'ordinateur utilisé, un Hewlett-Packard (série 2100), nous avons dû faire un fort découpage du programme et, en même temps, une grande quantité de résultats intermédiaires et de variables n'ont pas pu être gardés en mémoire centrale et ont été stockés sur disque :

a) Les matrices de raideur RK(6,6) partielles de chaque élément.

b) Les matrices DB (3,6), produit des matrices $[D]_T [B]$ qui nous permettent le calcul des $\{\Delta\sigma\}$ à partir des $\{\Delta\delta\}$:

$$\{\Delta\sigma\} = [DB]\{\Delta\delta\} .$$

c) La matrice $[K]_T$ globale, stockée sous forme compacte : SM $(2N_p, 60)$.

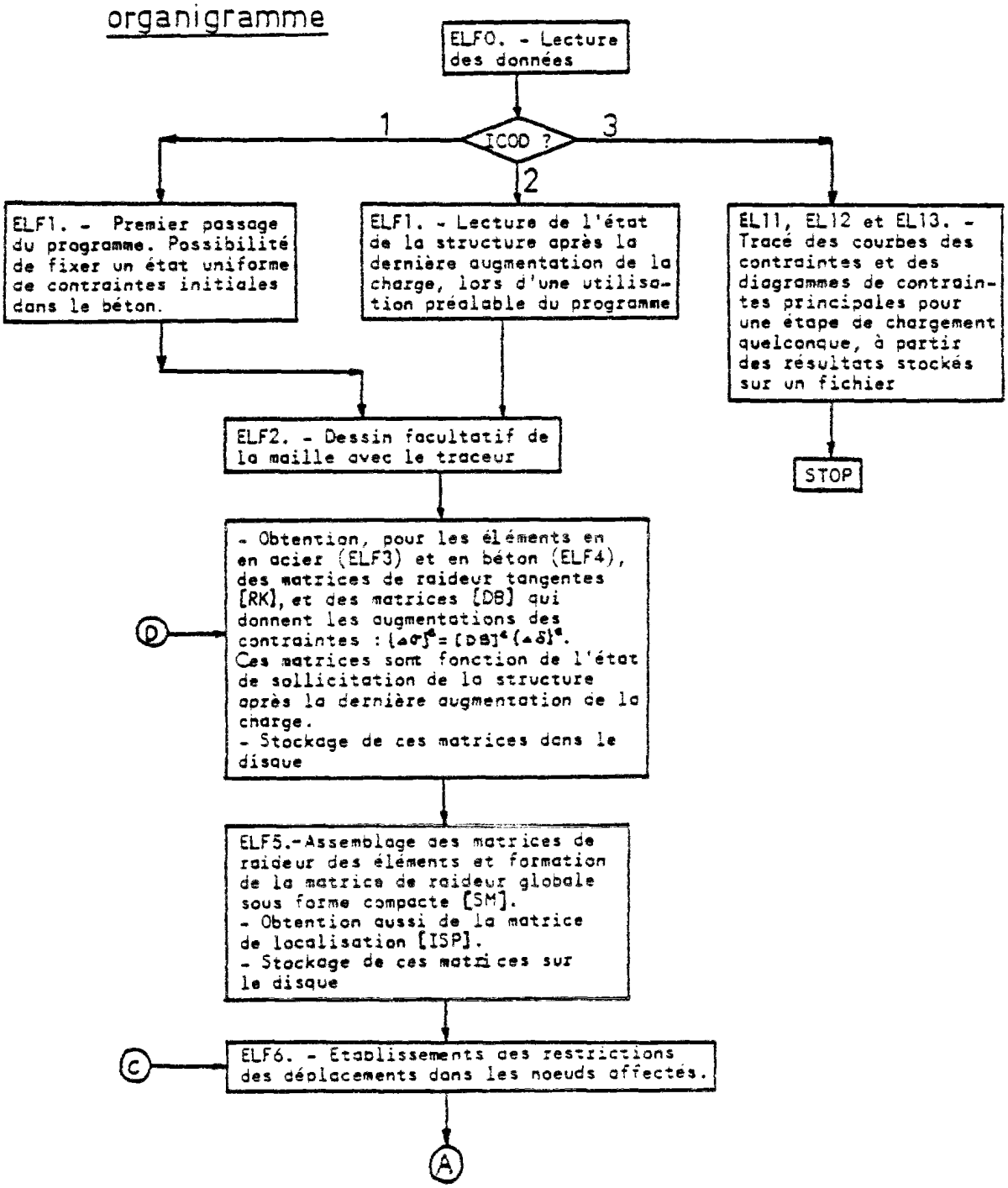
d) La matrice ISP $(30, N_p)$ de localisation des termes stockés sur SM.

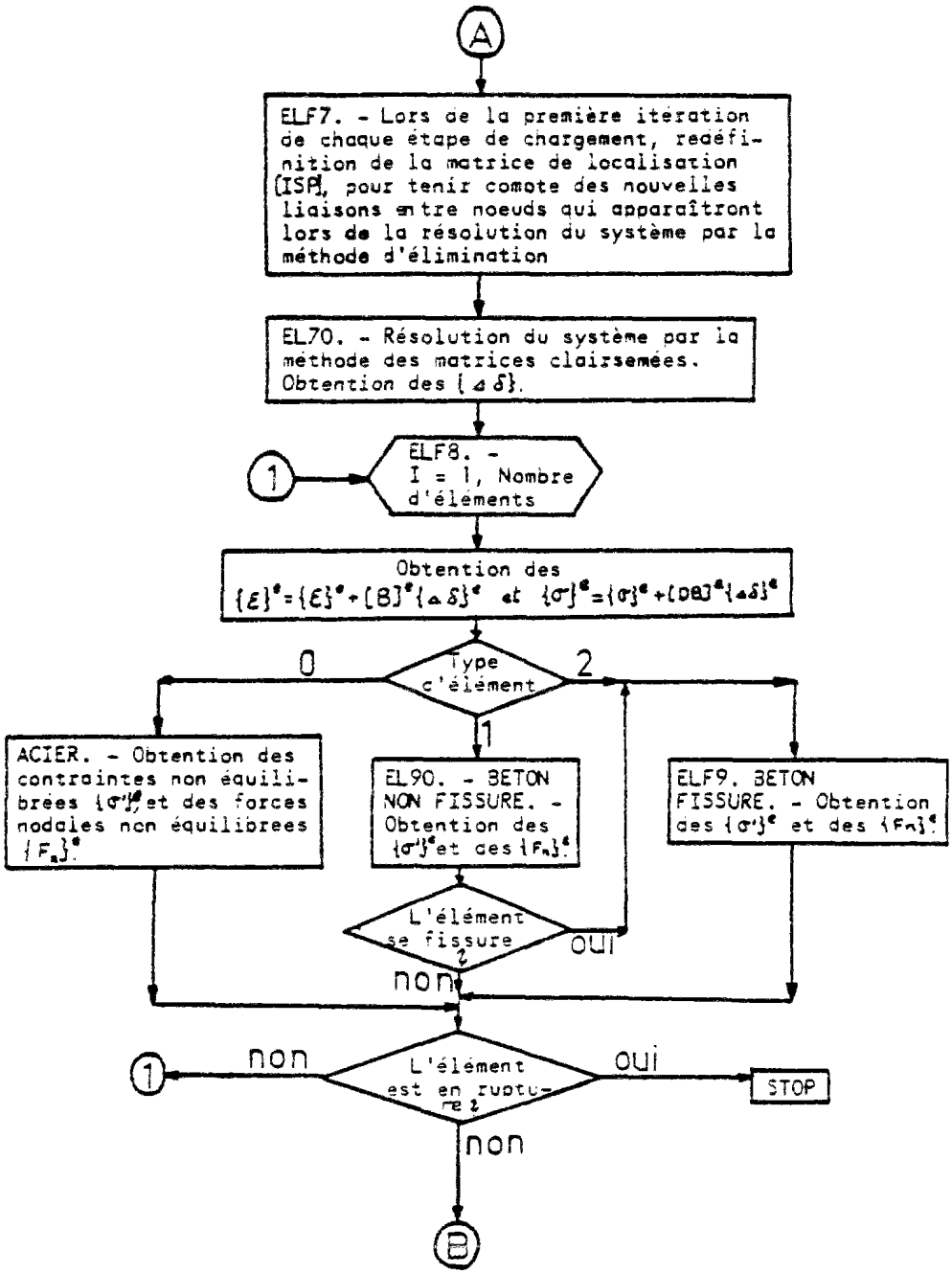
e) Une matrice auxiliaire TM $(2N_p, 60)$ nécessaire pour la résolution du système d'équations.

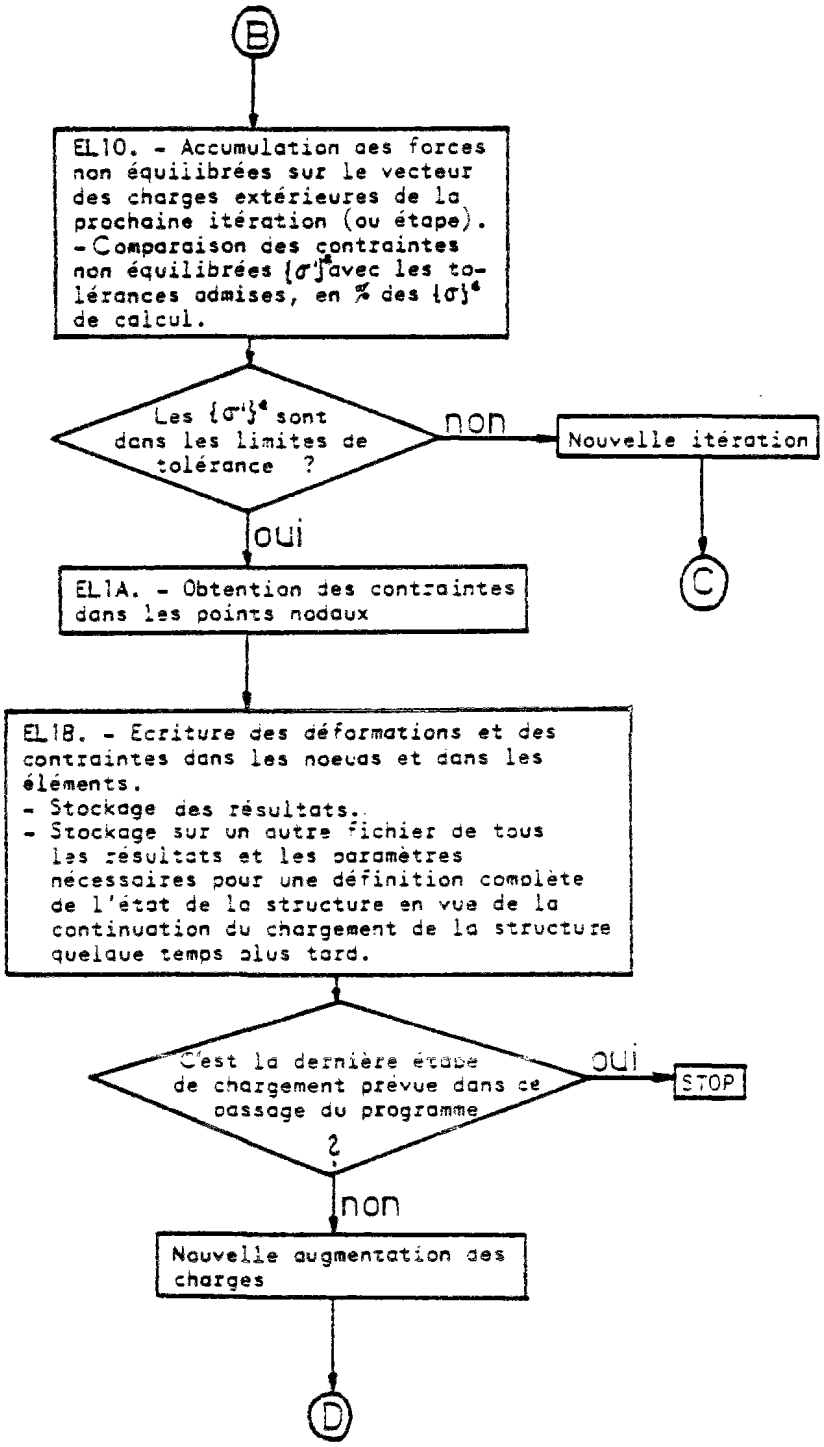
Les subroutines 'BWR' et 'SWO' nous permettent de réaliser avec rapidité et simplicité toute sorte de transférences mémoire centrale-disque.

Dans l'annexe C , on trouve les listings avec la programmation du programme 'ELF' dont l'organigramme est présenté ci-après.

organigramme




A
ELF7. - Lors de la première itération de chaque étape de chargement, redéfinition de la matrice de localisation [ISP], pour tenir compte des nouvelles liaisons entre noeuds qui apparaîtront lors de la résolution du système par la méthode d'élimination
EL70. - Résolution du système par la méthode des matrices clairsemées. Obtention des {Δδ}.
1
ELF8. - I = 1, Nombre d'éléments
Obtention des {ε}ᵉ={ε}ᵉ+[B]ᵉ{Δδ}ᵉ et {σ}ᵉ={σ}ᵉ+[DB]ᵉ{Δδ}ᵉ
0
Type d'élément
2
1
ACIER. - Obtention des contraintes non équilibrées {σ'}ᵉ et des forces nodales non équilibrées {Fₙ}ᵉ.
EL90. - BETON NON FISSURE. - Obtention des {σ'}ᵉ et des {Fₙ}ᵉ.
ELF9. BETON FISSURE. - Obtention des {σ'}ᵉ et des {Fₙ}ᵉ.
L'élément se fissure ?
oui
non
1
non
L'élément est en rupture ?
oui
STOP
non
B


B
EL10. - Accumulation des forces non équilibrées sur le vecteur des charges extérieures de la prochaine itération (ou étape).
- Comparaison des contraintes non équilibrées {σ'}* avec les tolérances admises, en % des {σ}* de calcul.
Les {σ'}* sont dans les limites de tolérance ?
non
Nouvelle itération
C
oui
EL1A. - Obtention des contraintes dans les points nodaux
EL1B. - Ecriture des déformations et des contraintes dans les noeuds et dans les éléments.
- Stockage des résultats.
- Stockage sur un autre fichier de tous les résultats et les paramètres nécessaires pour une définition complète de l'état de la structure en vue de la continuation du chargement de la structure quelque temps plus tard.
C'est la dernière étape de chargement prévue dans ce passage du programme ?
oui
STOP
non
Nouvelle augmentation des charges
D

B) ETUDE COMBINEE DES EFFORTS PLANS ET DE FLEXION. -

3.9. - Généralités. -

L'étude non élastique faite par la méthode des éléments finis bidimensionnels n'est pas suffisante puisqu'elle ne considère pas la présence de fortes flexions locales qui apparaissent aux alentours du bossage, et qui ont vraisemblablement une forte influence sur le développement des fissures et donc sur le comportement non linéaire de la structure. L'incorporation des phénomènes de flexions est donc indispensable.

Il y a deux principales manières d'envisager le problème :

a) La première part d'une vision macroscopique du problème. Elle est basée dans l'adoption d'une loi empirique moment-courbure qui reflète en quelque sorte le comportement variable du matériau sous une charge croissante.

b) La deuxième suppose l'élément divisé en plusieurs couches, lesquelles doivent vérifier une certaine relation de compatibilité des déformations. Cela permet d'une part la considération séparée du béton et de l'acier, et d'autre part la prise en compte de la variation du comportement des matériaux le long de l'épaisseur de la dalle, en fonction de l'état de déformations en chaque point et à chaque étape du chargement.

Nous avons utilisé cette deuxième méthode, et ceci pour deux raisons importantes :

1 - Elle permet de tenir compte du couplage entre les efforts plans et ceux de flexion, dont nous parlerons plus loin. Ceci est essentiel dans le problème qui nous intéresse.

2 - Elle suppose les couches travaillant sous un état bidimensionnel de contraintes. Cela nous permet d'utiliser la même modèle de comportement du béton que pour le calcul pan.

3.10 - Hypothèses adoptées. -

Les principales hypothèses que nous avons adopté peuvent être résumées tel que suit :

a) L'épaisseur de la dalle est divisée en couches (fig 3.20). Chaque couche peut avoir des propriétés différentes, mais ces propriétés sont supposées constantes sur l'épaisseur de la couche.

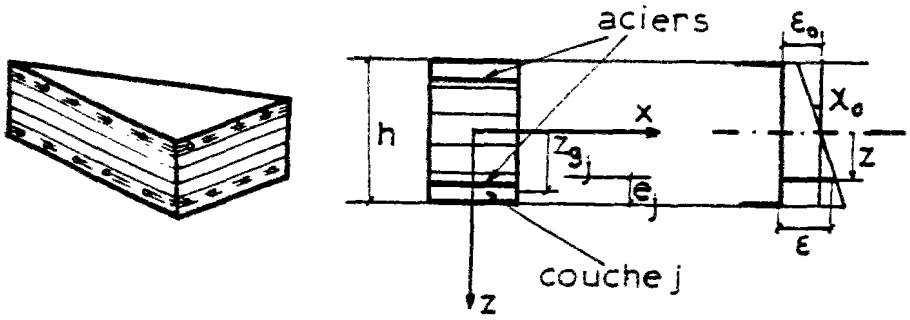


FIG 3.20

b) Nous adoptons les hypothèses de Kirchhoff :

— Les points situés initialement sur une normale au plan moyen de la dalle restent après l'application de la charge sur une normale à la surface moyenne de la plaque déformée.

— Les contraintes normales dans la direction transversale de la dalle (σ_z) sont négligeables.

La première hypothèse nous permet d'obtenir les déformations de chaque couche en fonction des déformations sur le plan moyen de la dalle :

$$\{\varepsilon_j\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_j = \{\varepsilon_o\} + [z_{g_j}, z_{g_j}, -z_{g_j}]\,\{\chi_o\},$$

où z_{g_j} est la coordonnée du centre de gravité de la couche 'j' et

$$\{\varepsilon_o\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_o \quad \text{et} \quad \{\chi_o\} = \begin{Bmatrix} -\omega''_{xx} \\ -\omega''_{yy} \\ 2\,\omega''_{xy} \end{Bmatrix},$$

respectivement les déformations planes et de flexion au niveau du plan moyen de la dalle (plan de référence).

La deuxième hypothèse nous permet de considérer chaque couche travaillant sous un état de contraintes plan, défini par le vecteur

$$\{\sigma_j\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_j$$

c) Les couches de béton sont supposées travailler sous un état bimensionnel de contraintes. Les lois σ-ε, les critères de rupture et de fissuration, sont traités comme en calcul bidimensionnel.

d) Les aciers passifs ne sont pas pris comme des éléments isolés. Nous considérons deux couches d'acier, proches des faces supérieure et inférieure de la dalle. Le centre de gravité des couches doit correspondre à celui des aciers. L'épaisseur de la couche est calculée de façon à ce que l'on obtienne une quantité d'acier "uniformément distribuée sur toute l'épaisseur de la couche" équivalente à la quantité réelle.

Les aciers sont supposés travailler seulement dans le sens longitudinal. Si l'on considère un ferraillage dont les barres sont disposées orthogonalement suivant les directions 'x' et 'y', les couches d'acier doivent avoir une raideur nulle vis-à-vis des déformations transversale à la couche :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_j = \begin{bmatrix} E_x & 0 & 0 \\ 0 & E_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_j \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_j$$

Nous négligeons la réduction du volume de béton due à la présence des aciers.

e) Nous ne considérons pas de glissements relatifs entre l'acier et le béton.

f) La raideur de l'élément est obtenue par simple addition des raideurs des différentes couches qui le composent.

g) Pour des raisons de capacité d'ordinateur, nous ne considérons pas les éléments des parois latérales du caisson. Nous allons établir, le long de la jonction hourdis-parois, les mêmes conditions de bords que dans la méthode des coupures : déplacements 'v' libres et déplacements 'ω', θ_x et θ_y bloqués.

Quant aux déplacements longitudinaux 'u', la prise en compte de la diffusion longitudinale de la précontrainte dans les parois va se faire par l'intermédiaire des appuis élastiques dans les noeuds de la jonction hourdis-parois. La constante élastique de chaque noeud est introduite comme donnée, et obtenue d'après un calcul plan de la structure avec le programme bidimensionnel 'ELF'.

3.11. - Type d'élément utilisé. -

— Nous allons utiliser des éléments triangulaires avec 15 degrès de liberté, cinq à chaque coin (fig 3.21) : 'u' et 'v' pour l'étude plane et 'w', 'θ_x' et 'θ_y' pour la flexion ($\theta_x = -w'_y$ et $\theta_y = w'_x$).

— En ce qui concerne l'étude plane, nous allons nous servir du même type d'élément que nous avons utilisé lors de l'étude bidimensionnelle : un élément triangulaire à déformation constante.

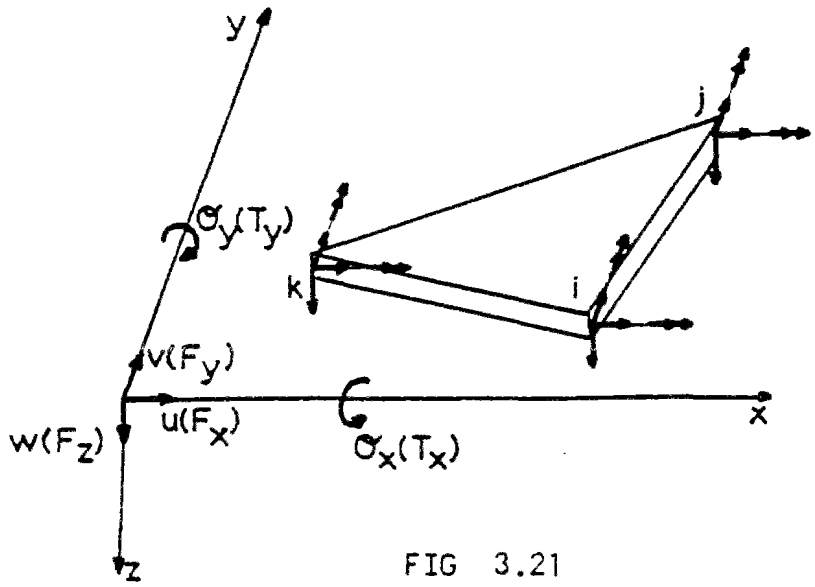


FIG 3.21

— Quant à la flexion, le choix du type d'élément a été imposé par la capacité de l'ordinateur et le temps de calcul : il fallait un élément le plus simple possible ; nous avons choisi l'élément triangulaire non conforme présenté par BAZELEY et autres (réf 31), et utilisé avec succés par CHEUNG, KING & ZIENKIEWICZ (réf 32) dans l'analyse de tabliers de pont.

— La fonction de déplacement à la forme :

$$w = \Big[\underset{[1\times 9]}{[L]} + \underset{[1\times 6]}{[N]}\,\underset{[6\times 9]}{[T]} \Big] \underset{[9\times 1]}{\{\delta\}} = [N'] \{\delta\}$$

avec

$$[\delta]^T = [w_i, \theta_{x_i}, \theta_{y_i}, w_j, \theta_{x_j}, \theta_{y_j}, w_k, \theta_{x_k}, \theta_{y_k}]$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{c_i}{2\Delta} & 1 & 0 & \frac{c_j}{2\Delta} & 0 & 0 & \frac{c_K}{2\Delta} & 0 & 0 \\ \frac{-b_i}{2\Delta} & 0 & 1 & \frac{-b_j}{2\Delta} & 0 & 0 & \frac{-b_K}{2\Delta} & 0 & 0 \\ \frac{c_i}{2\Delta} & 0 & 0 & \frac{c_j}{2\Delta} & 1 & 0 & \frac{c_K}{2\Delta} & 0 & 0 \\ -\frac{b_i}{2\Delta} & 0 & 0 & \frac{-b_j}{2\Delta} & 0 & 1 & \frac{-b_K}{2\Delta} & 0 & 0 \\ \frac{c_i}{2\Delta} & 0 & 0 & \frac{c_j}{2\Delta} & 0 & 0 & \frac{c_K}{2\Delta} & 1 & 0 \\ -\frac{b_i}{2\Delta} & 0 & 0 & \frac{-b_j}{2\Delta} & 0 & 0 & \frac{-b_K}{2\Delta} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[L] = [L_1 \quad 0 \quad 0 \quad L_2 \quad 0 \quad 0 \quad L_3 \quad 0 \quad 0]$$

$$[N] = [[N_i] \quad [N_j] \quad [N_K]]$$

$$\underset{[2\times 1]}{[N_i]^T} = \begin{bmatrix} b_K(L_2^2 L_2 + 1/2\ L_1 L_2 L_3) - b_j(L_1^2 L_3 + 1/2\ L_1 L_2 L_3) \\ c_K(L_1^2 L_2 + 1/2\ L_1 L_2 L_3) - c_j(L_1^2 L_3 + 1/2\ L_1 L_2 L_3) \end{bmatrix}$$

$[N_j]$ et $[N_K]$ sont obtenues par rotation des indices,

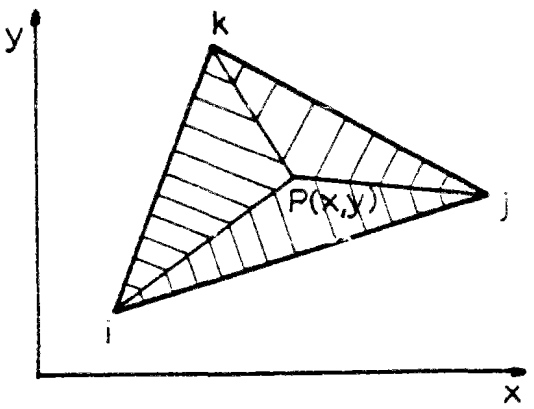
L_1, L_2 et L_3 sont les coordonnées de surface, définies dans la fig 3.22 ,

et finalement,

$a_i = x_j y_K - x_K y_j$; $b_i = y_j - y_K$; $c_i = x_K - x_j$

$a_j = x_K y_i - x_i y_K$; $b_j = y_K - y_i$; $c_j = x_i - x_K$

$a_K = x_i y_j - x_j y_i$; $b_K = y_i - y_j$; $c_K = x_j - x_i$



$L_1 = (a_i + b_i x + c_i y)/2\Delta$
$L_2 = (a_j + b_j x + c_j y)/2\Delta$
$L_3 = (a_K + b_K x + c_K y)/2\Delta$

L'obtention et la justification d'une telle fonction de déplacement se trouve dans la référence 31.

FIG 3 22

— La matrice [B] qui relie les déformations et les déplacements est obtenue par dérivation de [N'] :

$$\underset{[3\times 6]}{[B]} = \begin{bmatrix} -[N'_i]''_{xx} & -[N'_j]''_{xx} & -[N'_k]''_{xx} \\ -[N'_i]''_{yy} & -[N'_j]''_{yy} & -[N'_k]''_{yy} \\ 2[N'_i]''_{xy} & 2[N'_j]''_{xy} & 2[N'_k]''_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[N_i]''_{xx} & -[N_j]''_{xx} & -[N_k]''_{xx} \\ -[N_i]''_{yy} & -[N_j]''_{yy} & -[N_k]''_{yy} \\ 2[N_i]''_{xy} & 2[N_j]''_{xy} & 2[N_k]''_{xy} \end{bmatrix} \underset{[6\times 9]}{[T]}$$

(3 x 9) (3 x 6)

Cette matrice [B] n'est pas constante mais fonction des coordonnées de chaque point. Pour des raisons de simplicité, qui seront étudiées plus loin, nous n'avons besoin que de sa valeur au centre de gravité de l'élément. Si nous prenons l'origine de coordonnées au dit centre :

$x_g = y_g = 0$, et les coordonnées de surface du c.d.g. :

$L_1 = L_2 = L_3 = \frac{a}{2\Delta}$ avec $a = a_i = a_j = a_k$

D'après les expressions précédentes, la matrice [B] affectée au c.d. g. de l'élément peut être facilement obtenue. Toutes les dérivées qui apparaissent peuvent être groupées en deux classes : celles des fonctions du type $L_i^2 L_j$ et celles de $L_1 L_2 L_3$.

Si l'on tient compte de :

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta}\left(b_1 \frac{\partial}{\partial L_1} + b_2 \frac{\partial}{\partial L_2} + b_3 \frac{\partial}{\partial L_3}\right) ,$$

et

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta}\left(c_1 \frac{\partial}{\partial L_1} + c_2 \frac{\partial}{\partial L_2} + c_3 \frac{\partial}{\partial L_3}\right) ,$$

nous arrivons aux expressions suivantes :

$$\frac{\partial}{\partial x^2}(L_1^2 L_2) = a[2 b_1^2 + 4 b_1 b_2] \cdot \frac{1}{8\Delta^3} \quad ;$$

$$\frac{\partial}{\partial y^2}(L_1^2 L_2) = a[2 c_1^2 + 4 c_1 c_2] \cdot \frac{1}{8\Delta^3} \quad ;$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}(L_1^2 L_2) = 2a[b_1 c_1 + b_1 c_2 + b_2 c_1] \cdot \frac{1}{8\Delta^3} \quad ;$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(L_1 L_2 L_3) = 2a[b_1 b_2 + b_2 b_3 + b_3 b_1] \cdot \frac{1}{8\Delta^3} \quad ;$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2}(L_1 L_2 L_3) = 2a[c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_3 c_1] \cdot \frac{1}{8\Delta^3} \quad ;$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y}(L_1 L_2 L_3) = a[b_1 c_2 + b_2 c_1 + b_2 c_3 + b_3 c_2 + b_3 c_1 + b_1 c_3] \cdot \frac{1}{8\Delta^3} \quad .$$

Celles qui restent sont obtenues par rotation des indices, et la matrice [B] affectée au c.d.g. de l'élément est donc définie.

3.12. - <u>Obtention de la matrice de raideur tangente $[K]_T$ et résolution du problème</u>. -

— Nous utilisons la convention de signes indiquée dans la fig 3.23.

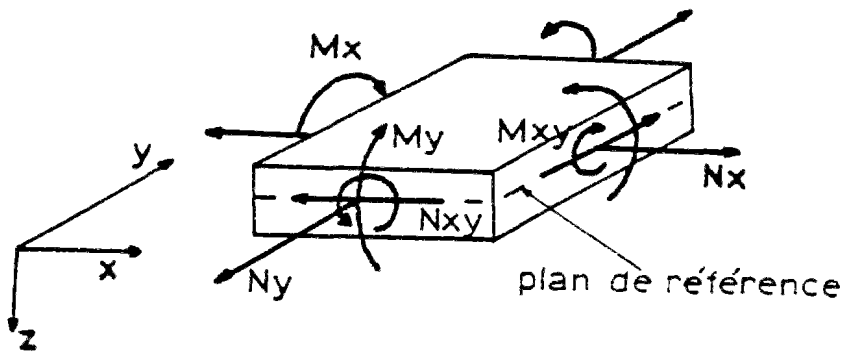


FIG 3.23.

— Nous avons pour chaque élément :

- vecteur déplacement : $\underset{[15\times 1]}{\{\Delta\delta\}^e} = \left\{\begin{array}{c}\Delta\delta_p \\ \hline \Delta\delta_f\end{array}\right\}^e$ où $\underset{[6\times 1]}{\{\Delta\delta_p\}^e} = \begin{Bmatrix}\Delta w_i \\ \Delta v_i \\ \vdots\end{Bmatrix}^e$ et $\underset{[9\times 1]}{\{\Delta\delta_f\}^e} = \begin{Bmatrix}\Delta w_i \\ \Delta\theta_{x_i} \\ \Delta\theta_{y_i} \\ \vdots\end{Bmatrix}^e$

- vecteur de charges :

$$\underset{[15\times 1]}{\{\Delta F\}^e} = \left\{\begin{array}{c}\Delta F_p \\ \hline \Delta F_f\end{array}\right\}^e \quad \text{où} \quad \underset{[6\times 1]}{\{\Delta F_p\}^e} = \left\{\begin{array}{c}\Delta F_{xi} \\ \Delta F_{yi} \\ \vdots\end{array}\right\}^e \text{ et } \underset{[9\times 1]}{\{\Delta F_f\}^e} = \left\{\begin{array}{c}\Delta F_{zi} \\ \Delta T_{xi} \\ \Delta T_{yi} \\ \vdots\end{array}\right\}^e$$

- vecteur des déformations

au niveau du plan moyen de la plaque :

$$\underset{[6\times 1]}{\{\Delta \varepsilon\}^e} = \left\{\begin{array}{c}\Delta \varepsilon_o \\ \hline \Delta \chi_o\end{array}\right\}^e \quad \text{où} \quad \underset{[3\times 1]}{\{\Delta \varepsilon_o\}^e} = \left\{\begin{array}{c}\Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \gamma_{xy}\end{array}\right\}_o^e \text{ et } \underset{[3\times 1]}{\{\Delta \chi_o\}^e} = \left\{\begin{array}{c}-\Delta \omega''_{xx} \\ -\Delta \omega''_{yy} \\ 2\Delta \omega''_{xy}\end{array}\right\}^e$$

— Les déformations sont reliés aux déplacements des noeuds selon les expressions :

$$\underset{[3\times 1]}{\{\Delta \varepsilon_o\}^e} = \underset{[3\times 6]}{[B_p]^e} \underset{[6\times 1]}{\{\Delta \delta_p\}^e} \quad \text{et} \quad \underset{[3\times 1]}{\{\Delta \chi_o\}^e} = \underset{[3\times 9]}{[B_f]^e} \underset{[9\times 1]}{\{\Delta \delta_f\}^e}$$

où $[B_p]^e$ et $[B_f]^e$ ont été respectivement obtenues dans les paragraphes 3.3.3 et 3.11.

Nous pouvons donc établir

$$\underset{[6\times 1]}{\{\Delta \varepsilon\}^e} = \underset{[6\times 15]}{\left[\begin{array}{c|c} B_p & 0 \\ \hline 0 & B_f \end{array}\right]^e} \underset{[15\times 1]}{\left\{\begin{array}{c}\Delta \delta_p \\ \hline \Delta \delta_f\end{array}\right\}^e}$$

— Le vecteur des "contraintes" $\{\Delta \bar{\sigma}\}$ est, en fait, composé par les efforts normaux et de cisaillement et les moments de flexion et de torsion par unité de longueur dans les directions 'x' et 'y' (fig 3.23)

$$\{\Delta \bar{\sigma}\}^e = \left\{\begin{array}{c}\Delta N_x \\ \Delta N_y \\ \Delta N_{xy} \\ \hline \Delta M_x \\ \Delta M_y \\ \Delta M_{xy}\end{array}\right\}^e = \left\{\begin{array}{c}\Delta \bar{N} \\ \hline \Delta \bar{M}\end{array}\right\}^e$$

où $\{\Delta \bar{N}\}^e$ et $\{\Delta \bar{M}\}^e$ sont obtenus par

intégration sur la hauteur de l'élément :

$$\{\Delta \bar{N}\}^e = \int \{\Delta\sigma\}^e dz$$

$$\{\Delta \bar{M}\}^e = \int [\bar{z}]\{\Delta\sigma\}^e dz$$

avec $\{\Delta\sigma\}^e = \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix}^e$ et $[\bar{z}] = [z, z, -z]$.

— Nous supposons chaque couche soumise à un état plan de contraintes et de déformations, reliés par l'expression :

$$\underset{[3\times1]}{\{\Delta\sigma_j\}^e} = \underset{[3\times3]}{[c_j]_T^e} \; \underset{[3\times1]}{\{\Delta\varepsilon_j\}^e}$$

où $[c_j]_T^e$ est une matrice tangente, variable pour chaque couche et pour chaque étape de chargement. Ces matrices $[c_j]_T^e$ sont obtenues suivant les critères établis pour le calcul bidimensionnel (voir paragraphe 3.4).

Etant donné que les propriétés du matériau varient de façon discrète sur l'épaisseur de l'élément, les intégrales sont obtenues par addition des intégrations sur chacune des couches.

En rappelant que nous avons adopté une loi de déformations telle que :

$$\{\Delta\varepsilon\}^e = \{\Delta\varepsilon_0\}^e + [\bar{z}]\{\Delta\chi_0\}^e$$

nous arrivons à :

$$\underset{[6\times1]}{\{\Delta\bar{\sigma}\}^e} = \begin{Bmatrix} \Delta\bar{N} \\ \Delta\bar{M} \end{Bmatrix}^e = \underset{[6\times6]}{[D]_T^e} \underset{[6\times1]}{\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_0 \\ \Delta\chi_0 \end{Bmatrix}}$$, où la matrice $[D]_T^e$ a la forme :

$$[D]_T^e = \sum_j \left[\begin{array}{c|c} e_j[c_j]_T^e & 1/2(t_{j+1}^2 - t_j^2)[c_j]_T^e \\ \hline 1/2(t_{j+1}^2 - t_j^2)[c_j]_T^e & 1/3(t_{j+1}^3 - t_j^3)[c_j]_T^e \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} D_1 & D_2 \\ \hline D_2 & D_3 \end{array}\right]^e$$

avec $t_j = z_{g_j} - e_j/2$, et $t_{j+1} = z_{g_j} + e_j/2$, e_j étant l'épaisseur de la couche 'j'.

—La matrice de raideur de l'élément $[k]_T^e$ aura donc la forme :

$$[k]_T^e = \int_e \left[\begin{array}{c|c} B_p^T & 0 \\ \hline 0 & B_f^T \end{array}\right]^e [D]_T^e \left[\begin{array}{c|c} B_p & 0 \\ \hline 0 & B_f \end{array}\right]^e dS$$

La matrice $[B_f]^e$ et par conséquent la matrice $[k]_T^e$ elle aussi, ne sont pas constantes à l'intérieur de l'élément. Il faudrait donc intégrer, mais, du fait de la complication des lois de comportement du béton sous charge biaxiale, cette intégration devient inabordable. Nous supposons donc que le comportement de l'élément peut être remplacé par celui de son centre de gravité :

$$[k]_T^e \simeq \left[\begin{array}{c|c} [B_p]^T[D_1]_T[B_p] & [B_p]^T[D_2]_T[B_f] \\ \hline [B_f]^T[D_2]_T[B_p] & [B_f]^T[D_3]_T[B_p] \end{array}\right]^e \Delta = \Delta \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c|c} k_{pp} & k_{pf} \\ \hline k_{fp} & k_{ff} \end{array}\right]_T^e \\ \begin{array}{cc} 6 & 9 \end{array} \end{array} \begin{array}{c} 6 \\ 9 \end{array}$$

—Les matrices $[k_{pp}]_T^e$ et $[k_{ff}]_T^e$ sont celles qui correspondraient à une étude plane ou de flexion respectivement. Les matrices $[k_{fp}]_T^e$ et $[k_{pf}]_T^e$ établissent le couplage entre les deux types d'efforts. Ces matrices sont nulles quand il y a une symétrie géométrique et mécanique totale de la section par rapport au plan moyen de la plaque (plan de référence). Cela n'est pas le cas pour les éléments du bossage, où le centre de gravité de la section ne coïncide pas avec celui de la plaque, ainsi que pour les éléments du hourdis à partir du moment où le comportement non linéaire des matériaux, et surtout la fissuration, déplacent le centre mécanique de la section par rapport au centre géométrique (plan moyen). L'inclusion de cette "rigidité de couplage" nous permet l'utilisation d'un plan de référence constante à travers les phases fissurées et non élastiques jusqu'à la rupture, et de tenir compte de l'intersection entre les efforts plans et de flexion, par suite de la présence du bossage.

—Une fois les matrices $[k]_T^e$ des différents éléments obtenues, on suit la démarche habituelle en éléments finis :

1. - Assemblage des matrices de raideur des différents éléments et obtention de la matrice de raideur $[K]_T$ globale de la structure, laquelle,

de même que dans le cas plan, est stockée de façon compacte : SM (5 Np, 100), accompagnée d'une matrice de localisation ISP (20,Np).

2. - Etablissement des restrictions de mouvements dans les noeuds affectés.

3. - Résolution du système d'équations $\{\Delta R^*\} = [K]_T \{\Delta \delta\}$ et obtention des déplacements des noeuds.

4. - Obtention des déformations dans le plan moyen de la plaque :

$$\left\{\frac{\Delta \varepsilon_o}{\Delta \chi_o}\right\}^e = \left[\begin{array}{c|c} B_p & 0 \\ \hline 0 & B_p \end{array}\right]^e \left\{\frac{\Delta \delta_p}{\Delta \delta_p}\right\}^e$$

5. - Obtention des contraintes au niveau du centre de gravité de chaque couche :

$$\{\Delta \sigma_j\}^e = [C_j]_T^e \left[\{\Delta \varepsilon_o\}^e + [z_{g_j}, z_{g_j}, -z_{g_j}] \{\Delta \chi_o\}^e\right]$$

Note. - On rappelle que, s'agissant d'une application de la charge par étapes, là où on dit 'déplacements', 'forces', 'déformations' et 'contraintes', on doit toujours lire 'augmentation des déplacements', 'des forces', etc.

3.13. - <u>Obtention des forces nodales non équilibrées</u>. -

Si nous supposons que chaque couche se trouve soumise à un état plan et uniforme de contraintes, dont les valeurs sont celles qui correspondent au centre de gravité de la couche, nous pouvons agir de façon identique à celle suivie dans l'étude bidimensionnelle et calculer, pour les déformations finales de la couche :

$$\{\varepsilon_j\}^e = \{\varepsilon_o\}^e + [z_{g_j}, z_{g_j}, -z_{g_j}] \{\chi_o\}^e, \quad \left(\text{où} \quad \begin{array}{l} \{\varepsilon_o\}^e = \{\varepsilon_o\}^e + \{\Delta \varepsilon_o\}^e \\ \{\chi_o\}^e = \{\chi_o\}^e + \{\Delta \chi_o\}^e \end{array}\right)$$

les contraintes théoriques $\{\sigma_j^*\}^e$ qui y règnent quand les déformations sont $\{\varepsilon_j\}^e$, d'après les lois de comportement adoptées pour les matériaux.

Par différence, nous obtenons les "contraintes non équilibrées" $\{\sigma'_j\}^e$

qui, intégrées sur le volume de la couche , nous donnent les forces nodales "non équilibrées", qu'il faut réappliquer sur les noeuds:

$$\{F_n^*\}_j^e = \int_{\text{couche } j'} [B_p]^{eT} \{\sigma'_j\}^e \, d\text{vol.} \simeq [B_p]^{eT} \{\sigma'_j\}^e \cdot e_j \cdot \Delta = \begin{Bmatrix} F_1^* \\ F_2^* \\ F_3^* \end{Bmatrix}_j^e$$

où $$\{F_\ell^*\}_j^e = \begin{Bmatrix} X_\ell \\ Y_\ell \end{Bmatrix}_j^e$$

Et par addition des forces nodales non équilibrées qui apparaissent au niveau de chaque couche, nous obtenons les forces totales non équilibrées, pour les trois noeuds de l'élément, rapportées au plan de référence :

Pour le noeud 'l' : $$\{F_\ell\}^e = \begin{Bmatrix} F_{x\ell} \\ F_{y\ell} \\ F_{z\ell} \\ T_{x\ell} \\ T_{y\ell} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_j X_{\ell j} \\ \sum_j Y_{\ell j} \\ 0 \\ \sum_j z_{gj} Y_{\ell j} \\ -\sum_j z_{gj} X_{\ell j} \end{Bmatrix}^e$$

3.14. - Programmation par ordinateur. -

3.14.1. - Caractéristiques. -

— Un programme de calcul automatique 'FLF' a été mis au point.

Ce programme s'est servi de certains modules du programme bidimensionnel 'ELF', notamment de ceux qui servent à résoudre le système d'équations et à étudier une couche de béton soumise à un état de contraintes biaxiales.

— Du fait de l'augmentation des calculs et surtout du nombre croissant de degrès de liberté des noeuds (5 par rapport à 2) la performance du programme est plus réduite : 350 éléments, 200 points nodaux, 60 points non libres.

La possibilité de ne pas considérer explicitement les éléments des parois latérales du caisson,et de traiter les aciers non comme des éléments

isolés mais en constituant deux couches (supérieure et inférieure) dans l'élément même, nous a permis de contrecarrer cette diminution de performance et d'établir un découpage de la structure suffisamment précis.

— Le programme permet d'établir des variations dans la distribution des aciers : on fixe des quantités d'acier longitudinal et transversal sur les couches supérieures et inférieure de tous les éléments, et il est possible de renforcer n'importe laquelle de ces quantités dans un élément quelconque.

— Le bossage est représenté par l'intermédiaire des éléments comportant un nombre variable de couches, plus grand que celui de la dalle (fig 3.24). Le béton des couches au-dessus du hourdis est supposé soumis à un état uniaxial de contraintes selon l'axe de la pièce. Les contraintes transversales sont donc supposées négligeables.

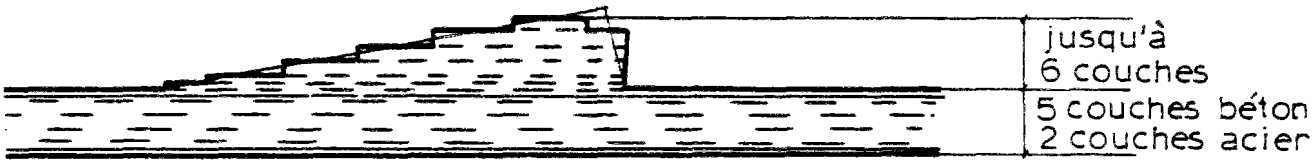
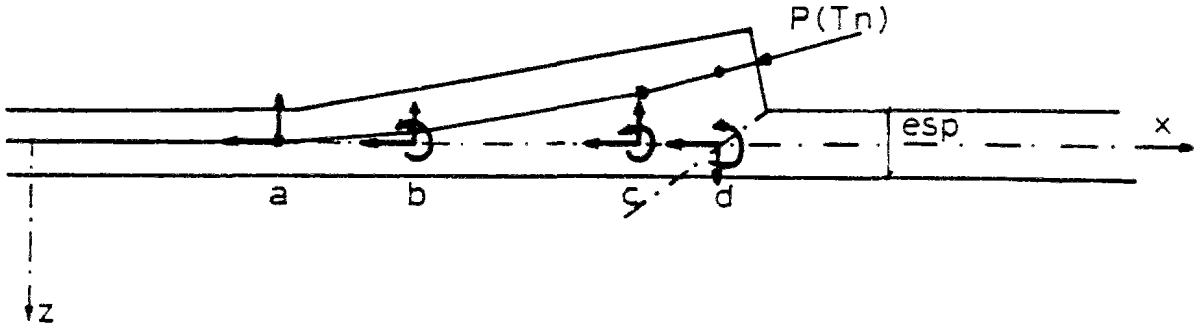


FIG 3.24

Néanmoins, on prendra en compte l'augmentation de la section, c'est-à-dire, la collaboration des couches supérieures du bossage, dans le calcul de la raideur transversale de la pièce.

— Nous avons fait le calcul en considérant une dalle décomposée en 7 couches (deux pour les aciers et cinq pour le béton).
Dans le bossage nous sommes arrivés jusqu'à 13 couches.

— L'application de la charge est schématisée dans la fig 3.25. La force de précontrainte est appliquée quelques centimètres ($\simeq esp/2$) à l'intérieur du bossage, pour mieux tenir compte de la diffusion de la précontrainte à l'intérieur de celui-ci.



Section	a	b	c	d
Fx/P(Kg)	-4.96	-12.50	-10.02	-972.52
Fz/P(Kg)	-99.50	-86.05	-46.90	+232.45
Ty/P(Kg·cm)	0	-43.44	-148.60	-19072.

FIG 3.25

— De même que pour le programme 'ELF', la petite capacité de l'ordinateur (28 K accessibles) oblige à stocker sur disque un grand nombre de variables et de résultats intermédiaires, qui sont :

a) Les matrices $[B_p]^e$, de dimension (3,9), de chaque élément.

b) Les matrices de raideur RK (15,15) de chaque élément.

c) Les matrices $[C_j]^e_T$, de dimension (3,3), qui relient les $\{\Delta\sigma_j\}^e$ et les $\{\Delta\varepsilon_j\}^e$ dans toutes les couches de tous les éléments.

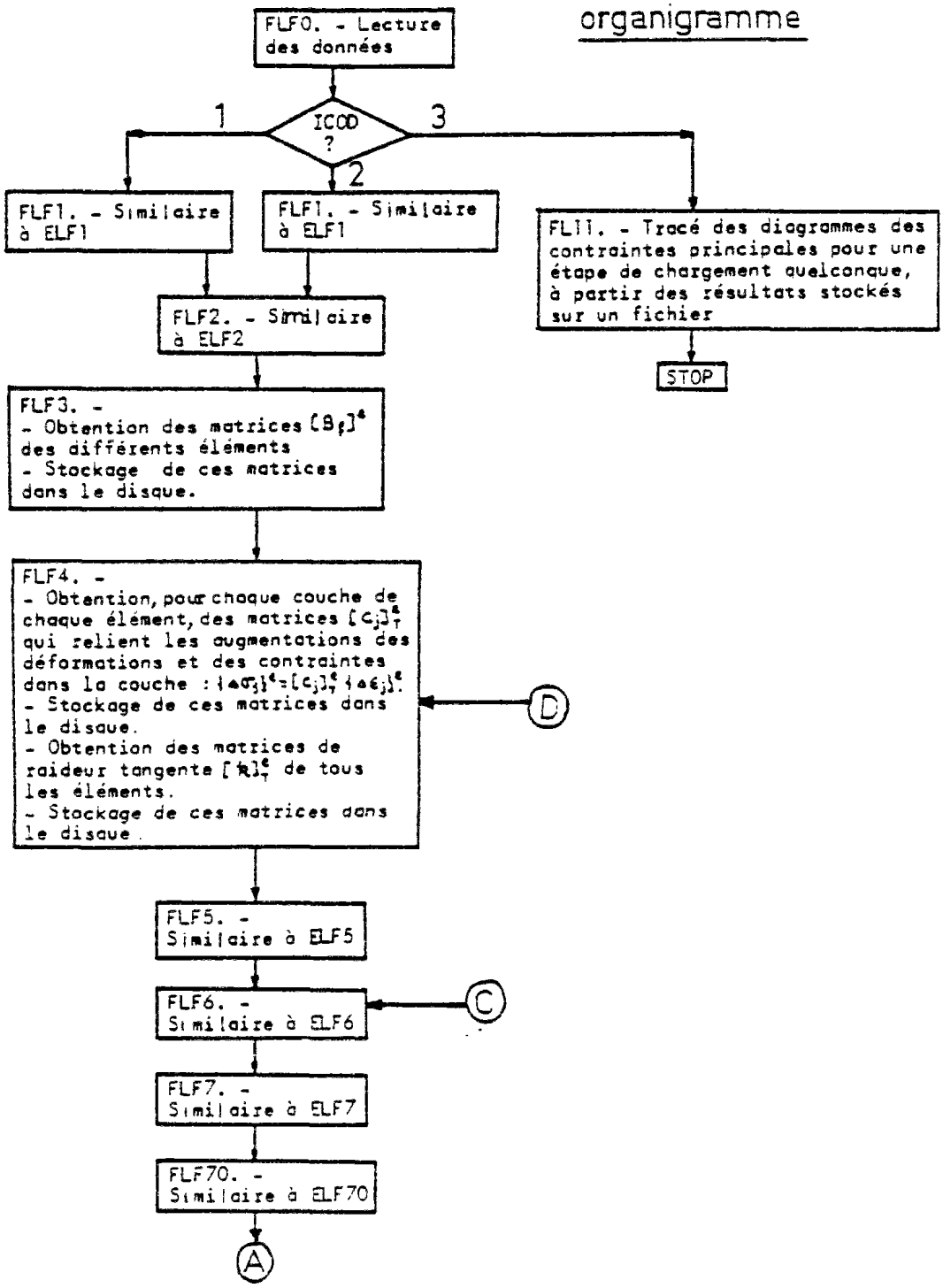
d) La matrice $[K]_T$ globale, stockée sous forme compacte : SM (5 N_p,100).

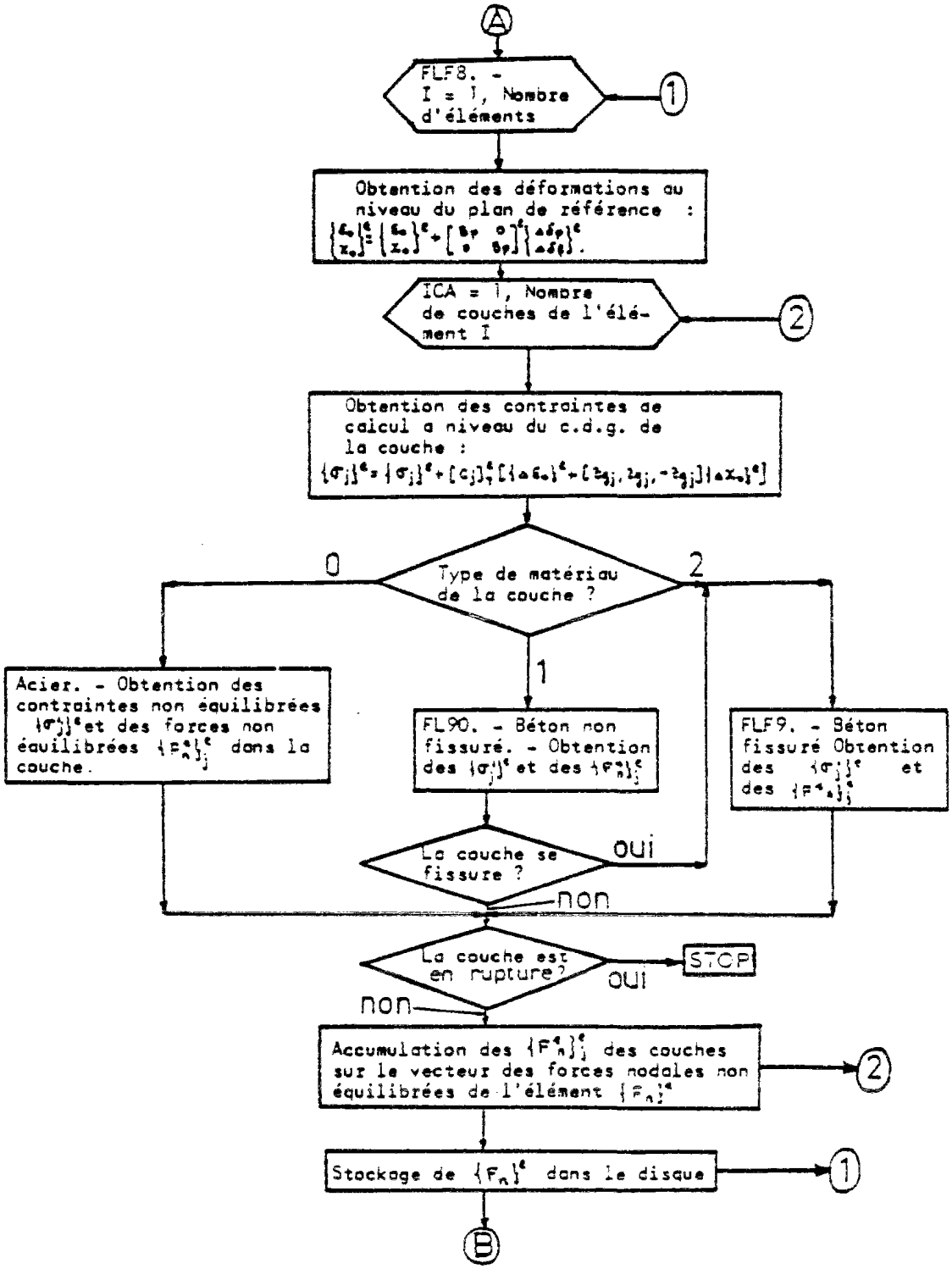
e) La matrice ISP (20,N_p) necessaire pour la résolution du système d'équations.

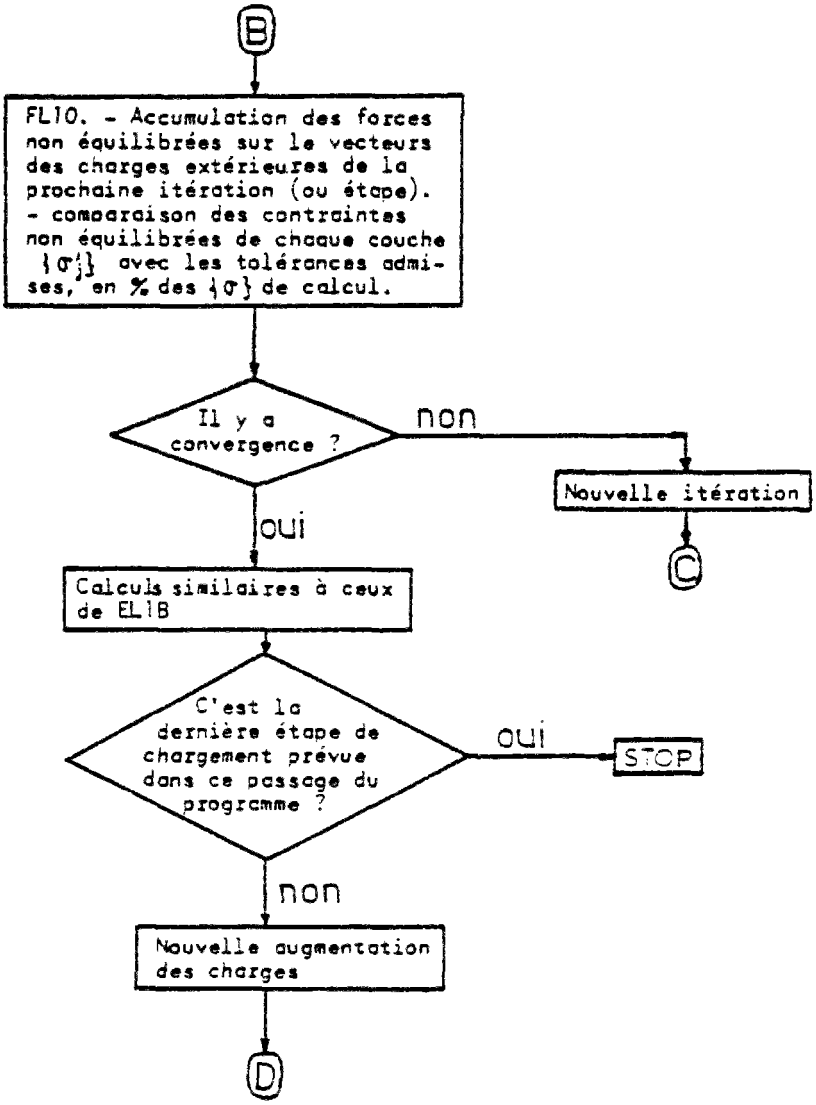
g) Les données concernant les renforcements des armatures dans les éléments qui en sont pourvus.

h) Les contraintes et les directions des fissures dans toutes les couches de tous les éléments.

—Dans l'annexe D nous présentons les listings du programme 'FLF' dont l'organigramme est montré ci-après.




A
FLF8. - I = 1, Nombre d'éléments
1
Obtention des déformations au niveau du plan de référence :
ICA = 1, Nombre de couches de l'élément I
2
Obtention des contraintes de calcul a niveau du c.d.g. de la couche :
Type de matériau de la couche ?
0
1
2
Acier. - Obtention des contraintes non équilibrées et des forces non équilibrées dans la couche.
FL90. - Béton non fissuré. - Obtention des et des
FLF9. - Béton fissuré Obtention des et des
La couche se fissure ?
oui
non
La couche est en rupture?
oui
STOP
non
Accumulation des des couches sur le vecteur des forces nodales non équilibrées de l'élément
2
Stockage de dans le disque
1
B


B
FL10. - Accumulation des forces non équilibrées sur le vecteurs des charges extérieures de la prochaine itération (ou étape).
- comparaison des contraintes non équilibrées de chaque couche $\{\sigma'_j\}$ avec les tolérances admises, en % des $\{\sigma\}$ de calcul.
Il y a convergence ?
non
Nouvelle itération
C
oui
Calculs similaires à ceux de EL1B
C'est la dernière étape de chargement prévue dans ce passage du programme ?
oui
STOP
non
Nouvelle augmentation des charges
D

CHAPITRE 4

ETUDE EXPERIMENTALE

4.1. - Programme des essais

— Une étude expérimentale préparatoire sur le sujet a été entreprise au Service d'Etude des Structures (CEBTP) en 1974, à la demande conjointe du SETRA et de l'UTI (voir réf 9).

Quatre essais, en grandeur réelle simulant l'ancrage par bossage d'un câble dans un voile en béton ont été réalisés. Le corps d'épreuve se composait d'une dalle verticale, portant l'ancrage, de dimensions 252 cm x 540 cm, avec une épaisseur de 15 ou 18 cm. La dalle était bordée de deux âmes perpendiculaires (section droite en forme de H) dont les dimensions ont été choisies de façon que le plan moyen du hourdis soit sensiblement à la limite du noyau central de la section transversale de la pièce. Celle-ci s'appuyait sur la section droite d'about. L'épaisseur de la dalle, à l'extrémité de la pièce derrière le bossage, a été renforcé (e = 40 cm) dans le but d'accroître la rigidité de la pièce et d'approcher les conditions réelles où l'ouvrage se prolonge bien au delà de l'ancrage. Le câble de précontrainte avait une résistance de 150 Tf environ, la charge de service étant de l'ordre de 80 Tf.

Cette série d'essais a apporté quelques renseignements sur le comportement de la pièce en phase élastique, mais les grandes ouvertures des fissures sont apparues pour des charges nettement plus fortes que celles de service et ne peuvent pas expliquer les dégâts trouvés dans certains ouvrages réels. Il semble qu'en général, l'effort concentré ne suffit pas, à moins de graves erreurs de conception et de réalisation, pour solliciter le béton du hourdis à un niveau suffisamment élevé sous les charges de service.

— La présente étude se proposait de continuer la recherche en envisageant la prise en compte de deux nouveaux facteurs :

- L'effet du groupement de plusieurs bossages.

- L'effet d'une compression d'ensemble initiale sollicitant uniformément le hourdis.

Le programme d'essais comporte trois séries d'essais. Les paramètres étudiés ont été d'une part le nombre d'ancrages (1 à 3), et d'autre part, la précompression générale du hourdis dans la zone des arrêts de câbles (effort total F appliqué aux extrémités du corps d'épreuve).

Série	A		B		C		
Corps d'épreuve	A1	A2	B1	B2	C		
Nombre d'ancrages	1		2		3		
Compression d'ensemble F	24 Tf (32bars)	42 Tf (56bars)	23 Tf (31bars)	42 Tf (52bars)	3 Tf (4bars)	24 Tf (32bars)	48 Tf (65bars

4.2. - Corps d'épreuve.

4.2.1. - Caractéristiques géométriques

— C'est au vu des grandes difficultés rencontrées, du fait de l'échelle réelle, dans la fabrication et dans la manutention des premières pièces en 1976, que nous avons choisi de travailler sur des modèles de plus petite échelle. Ce qui a permis de simplifier beaucoup l'exécution des essais, et d'étendre plus le champ d'études.

La taille pour ces nouvelles pièces d'essai, a été choisie d'une part de façon, à répondre encore à la définition du béton armé, et d'autre part, à être compatible avec les moyens de précontrainte existants.

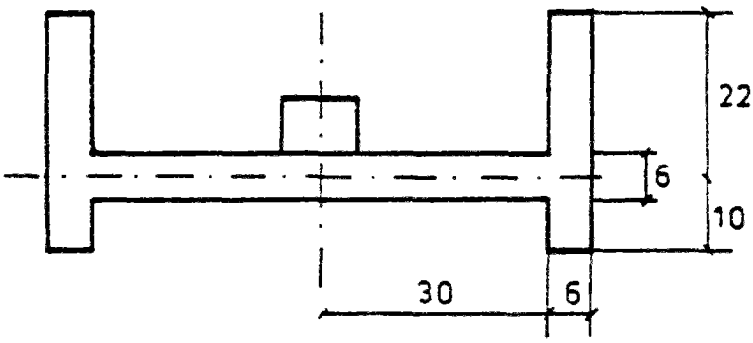
C'est aussi par souci de simplification, que nous avons adopté dans les deux premières séries d'essais (A et B), des "âmes" préfabriquées et récupérables à chaque fois. L'assemblage du hourdis se faisait alors mécaniquement, au moyen de boulons sur douilles noyées, serrés avec une légère précontrainte. Dans le dernier corps d'épreuve C, la liaison était plus habituelle en béton armé. Les âmes préfabriquées servirent alors de coffrages latéraux au hourdis lors du bétonnage (reprise de bétonnage avec armatures en attente).

Nous verrons plus loin dans quelle mesure le système utilisé dans les séries A et B est loin de reproduire d'une façon satisfaisante les conditions réelles d'encastrement parfait entre le hourdis et les ailes.

— La plus petite unité de précontrainte disponible était des monotorons To,5 (Pu = 16,5 Tf, $\emptyset_g$ = 2 cm). Il a fallu retenir une épaisseur minimale de 6 cm pour le hourdis. Les dimensions du bossage ont été obtenues en se basant sur les essais de 1974, en prévoyant un effort maximal réduit par 10. L'échelle des longueurs pouvait donc être de $\frac{1}{\sqrt{10}} \simeq 0.3$

Quant aux autres dimensions, l'échelle de réduction était modulée entre 1/4 et 1/3, pour prendre en compte diverses conditions d'exécution.

— Les caractéristiques de la section transversale sont les suivantes (fig 4.1) :



Surface = 744 cm^2

y_g = 13.1 cm

I_g = 40537 cm^4

ECOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES BIBLIOTHÈQUE

FIG 4.1

- Les dimensions extérieures des corps d'épreuve sont les mêmes dans tous les essais (fig 4.2, 4.3 et 4.4) : hourdis de 60 x 180 cm (épaisseur 6 cm), bordé latéralement par deux plaques perpendiculaires de la même épaisseur et de dimensions 32 x 180 cm.

4.2.2 - Armatures passives (fig 4.5 et 4.6)

4.2.2.1 - Ferraillage des âmes

Il est assuré longitudinalement par des barres T6 sur deux nappes et transversalement par des cadres de même nature espacés de 8 cm.

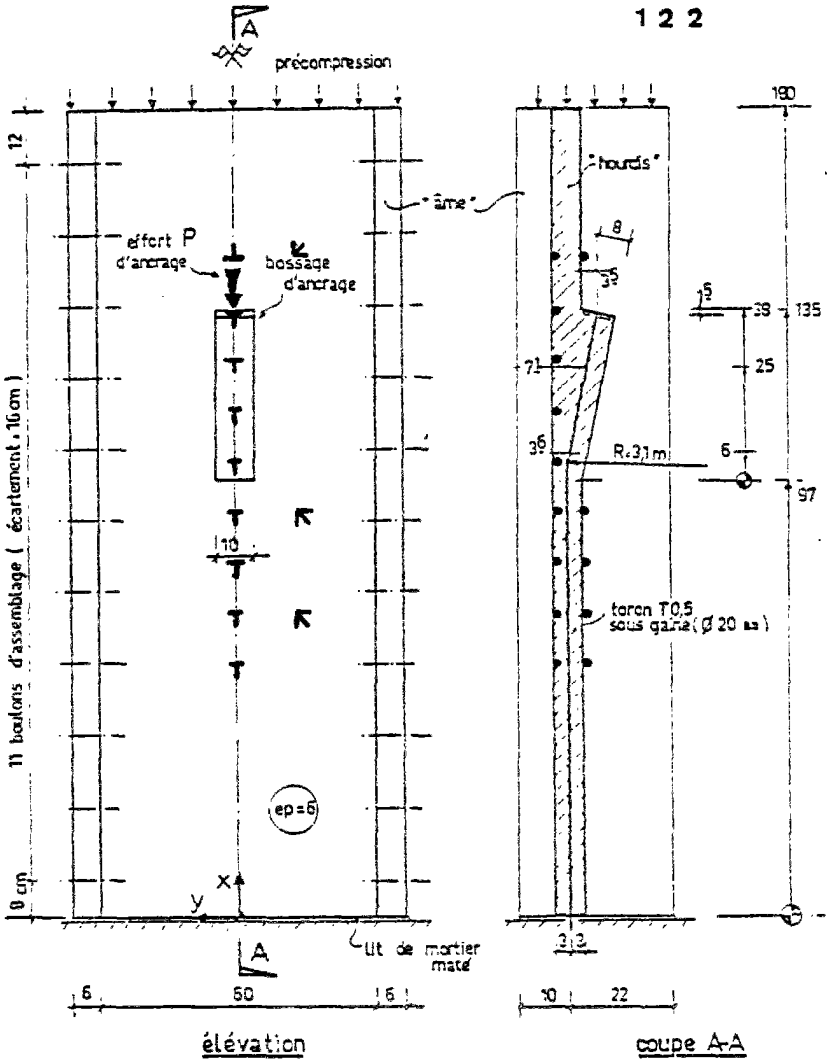


Fig. 4.2. - Corps d'épreuve A

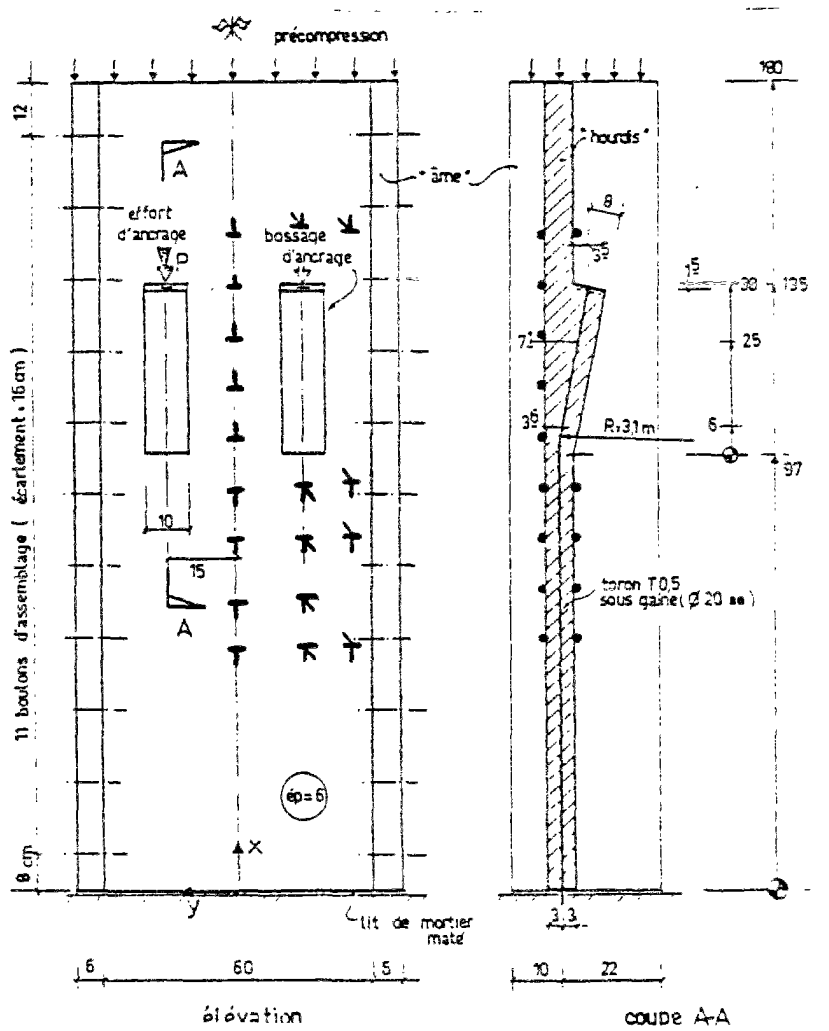
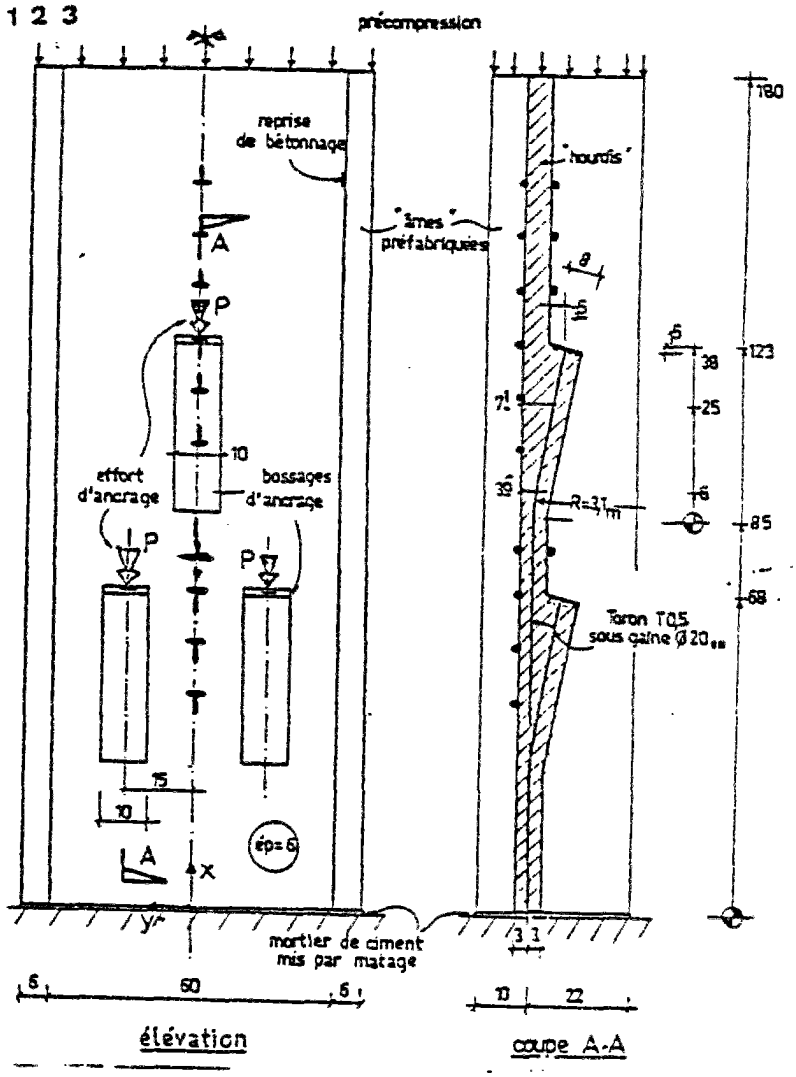


Fig. 4.3.- Corps d'épreuve B

Fig. 4.4.-Corps d'épreuve C



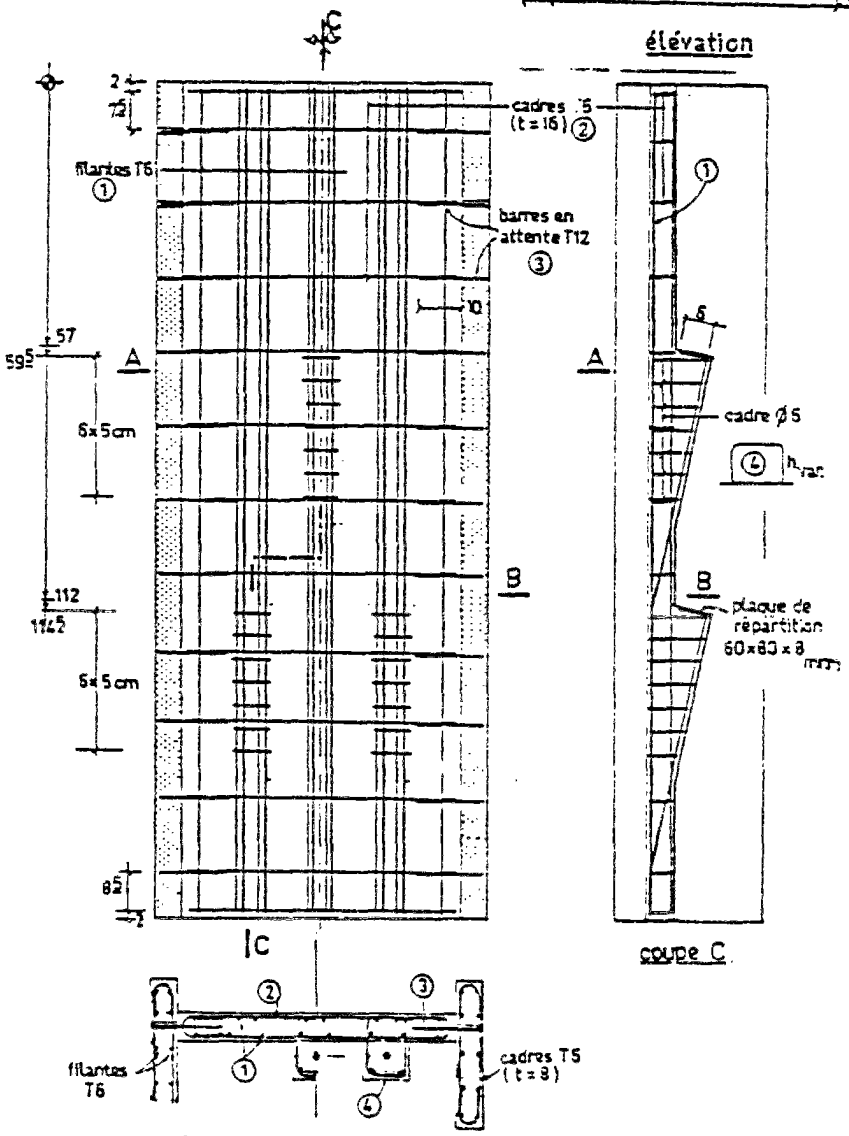


Fig. 4.5.-Ferraillage du corps d'épreuve C

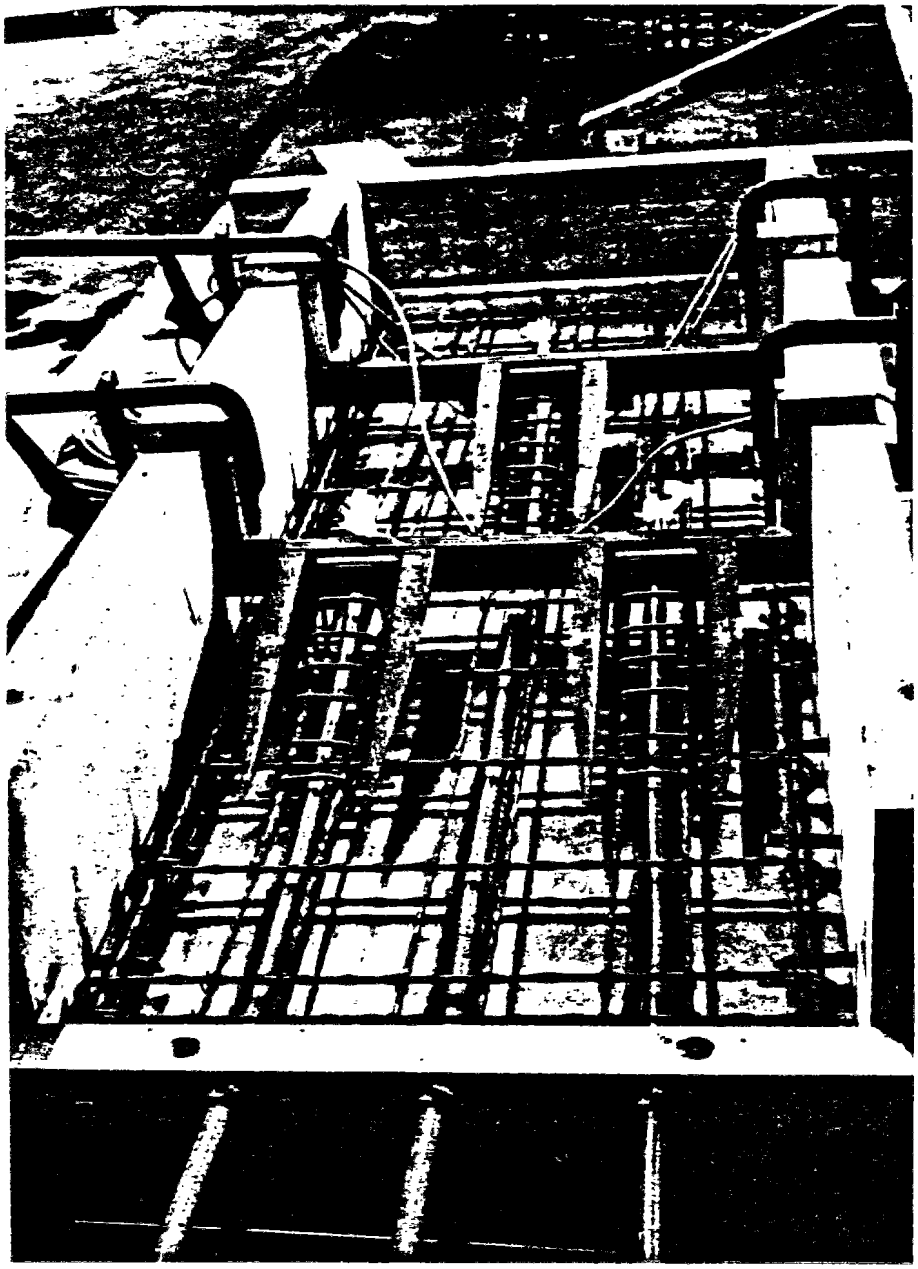


Fig. 4.6 - Vue du ferraillage du corps d'épreuve C.

Tous les 16 cm on a aménagé des orifices pour permettre le passage des boulons qui relient le hourdis aux âmes.

4.2.2.2. - Ferraillage du hourdis

Il est assuré lui aussi à l'aide de barres T6 disposées sur deux nappes prés des paraments.

Le bossage a été armé en tenant compte des résultats obtenus lors de l'étude préparatoire de 1974. Des armatures supplémentaires en cadres fermés horizontaux apportaient le renforcement nécessaire.

Chaque bossage comportait tout le dispositif pour l'ancrage d'un monotoron T0,5, notamment une plaque de répartition d'effort de 60 x 80 mm, et 8 mm d'épaisseur.

4.2.3. - Le béton

Il a la même composition pour tous les corps d'épreuve :

Composition	Gravier (5-8 mm)	Sable (0-5 mm)	CPALC 325	Eau
Poids par m^3	1012 kgp	810 kgp	325 kgp	215 litres
%	42.8	34.2	13.8	9.2

L'affaissement au cône d'Abrams s'élevait vers 5 à 6 cm.

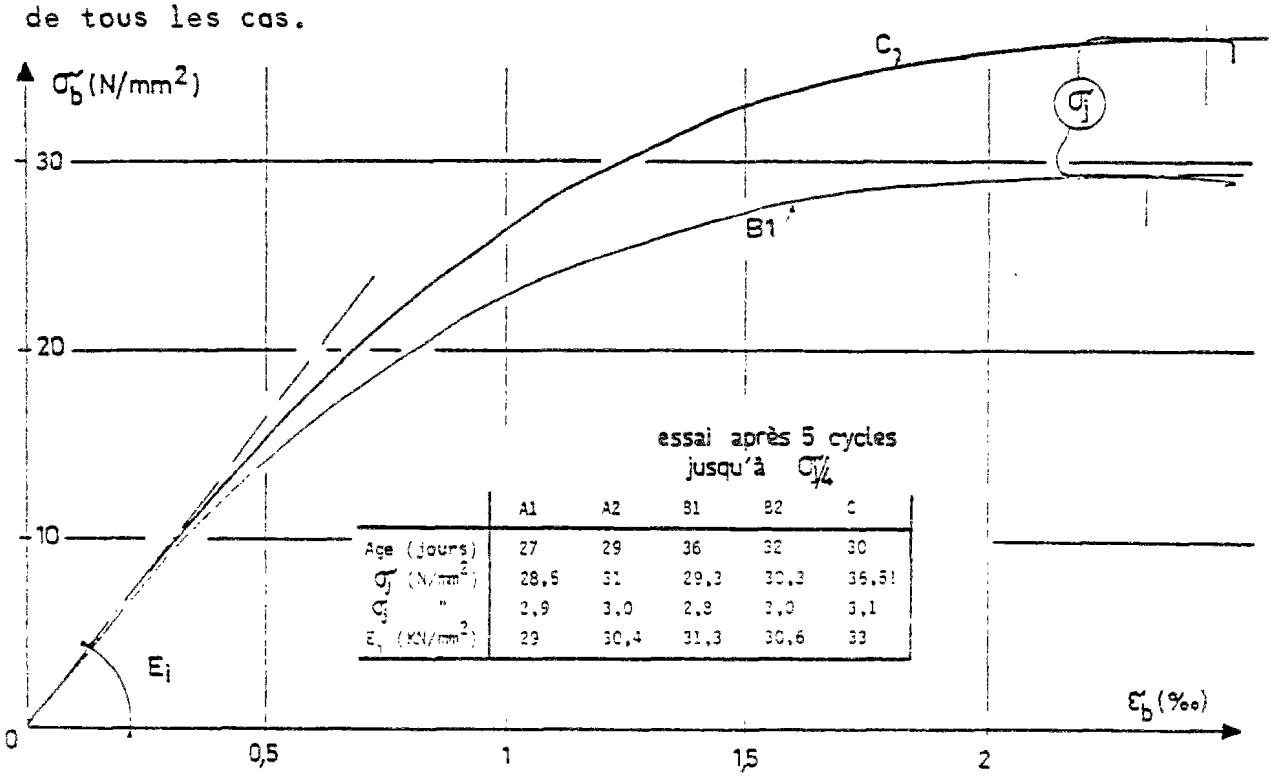
Après le décoffrage, après 2 jours d'âge, les pièces d'essai étaient placées sous cure de brouillard et à la température ambiante, pendant une dizaine de jours. Elles étaient ensuite amenées et conservées dans le hall d'essai en atmosphère conditionnée (55 % de humidité relative, et 20° C environ).

A chaque bétonnage de hourdis, on prélevait six cylindres normalisés de béton. Ces éprouvettes avaient subi les mêmes conditions de conservation que les pièces associées. Elles avaient servi à contrôler les caractéristiques mécaniques du béton, au jour même de l'essai du corps d'épreuve :

- les essais en compression simple, fournissaient le diagramme $\sigma-\varepsilon$ en compression (notamment le module élastique E_i), et la résistance en compression σ'_j

- les essais de fendage, suivant deux génératrices opposées, la contrainte ultime en traction σ_j

La figure 4.7 présente, à titre d'exemple, les diagrammes des bétons des essais B1 et C, ainsi que les caractéristiques mécaniques moyennes de tous les cas.



	A1	A2	B1	B2	C
Age (jours)	27	29	36	32	30
σ_j (N/mm²)	28,5	31	29,3	30,3	35,51
σ_j "	2,9	3,0	2,8	3,0	3,1
E_i (KN/mm²)	29	30,4	31,3	30,6	33

FIG. 4.7

4.2.4. - Câbles de precontrainte

Il s'agit des monotorons To,5 (Pu = 16.5 Tf, $\emptyset_g$ = 2 cm) munis d'un ancrage passif filé.

Dans la pièce, un évidement obtenu par une gaîne métallique souple, de 20 mm de diamètre, est prévu pour l'enfilage ultérieur du câble.

4.3.- Exécution des essais

4.3.1. - Dispositif expérimental

Les figures 4.8 à 4.11 indiquent les dispositifs expérimentaux adoptés respectivement pour les corps d'épreuve A, B et C.

- La pièce, mise debout, reposait sur un bloc massif de répartition par l'intermédiaire d'un lit de mortier, placé par matage après le réglage de la verticalité. Les câbles servant à la précontrainte traversaient ce bloc inférieur pour s'ancrer en dessous (ancrage passif).
- Le chargement du corps d'épreuve se distingue en :

a) Une précompression générale F, développée en tête par un vérin hydraulique s'appuyant sur une chevêtre de répartition.

b) La mise en traction des câbles de précontrainte, au moyen des vérins de 30Tf.

4.3.2. - Dispositifs de mesure

4.3.2.1. - Jauges béton

Les déformations du béton sur les surfaces du hourdis sont obtenues au moyen de jauges extensomètriques (jauges PL 30), collées sur la peau du béton et disposées en deux directions perpendiculaires ou en trois orientées à 45° (rosettes).

Le positionnement des jauges est donné sur les figures 4.2, 4.3 et 4.4.

Des mesures ont été également effectuées sur les nervures latérales, près de l'appui de la pièce, en vue de vérifier la bonne transmission des efforts entre le hourdis et les âmes, ainsi que la bonne diffusion de la précontrainte.

4.3.2.2. - Jauges acier

On a collé des jauges FLA3 sur les aciers longitudinaux et transversaux avant le bétonnage et en faisant sortir en réseau de câbles permettant de relier les jauges à la centrale de mesure.

4.3.3. - Tableau de chargement et phases de mesure

Le béton des corps d'épreuve avait toujours entre 27 et 36 jours d'âge lors des essais.

Après des cycles de préchargement pour assurer, d'une part une bonne mise en place de la pièce sur ses appuis, et écrouir d'autre part légérement le béton, les références des mesures sont relevées sous une faible charge de précompression générale F et de tension du câble de précontrainte.

Puis on a appliqué la précompression générale prévue, après quoi de nouvelles mesures ont été relevées, et on a tendu ensuite un ou plusieurs câbles, par paliers d'une tonne. Des mesures ont été prises à chaque étape. A la charge de 11 Tf, nous avons réalisé cinq cycles de chargement-déchargement pour accélérer s'il y a lieu la stabilisation des phénomènes.

A l'essai C, après l'application de F à la valeur prévue, nous avons maintenu dans les deux bossages inférieurs un effort P_2 (pour chaque bossage) de 11 Tf. Puis, seul l'effort d'ancrage dans le bossage supérieur a été augmenté jusqu'au maximum.

En général, les essais étaient arrêtés à la rupture du câble (17 Tf environ).

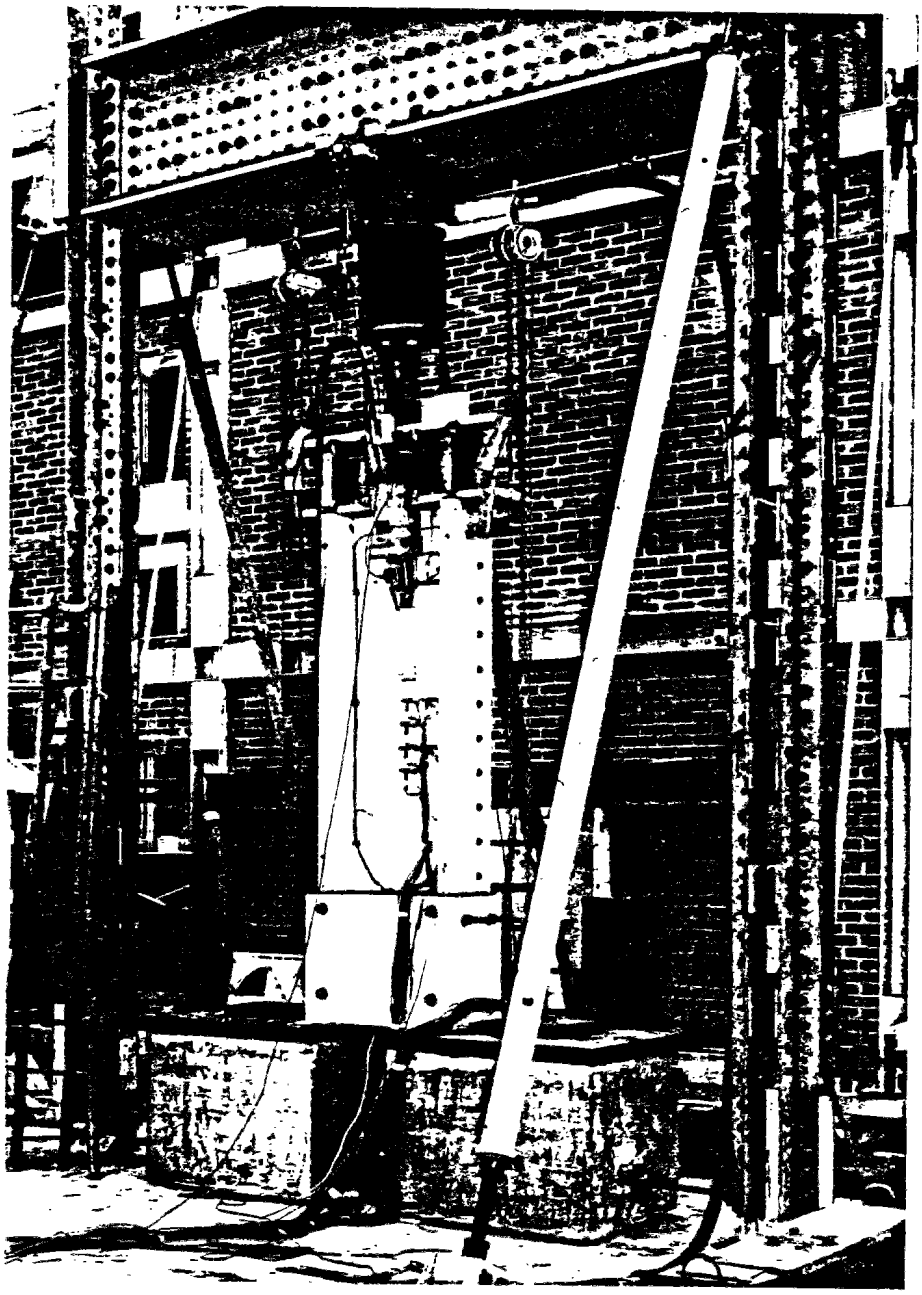


Fig. 4.8 - Vue du dispositif d'essai à un seul brossage d'ancrage.

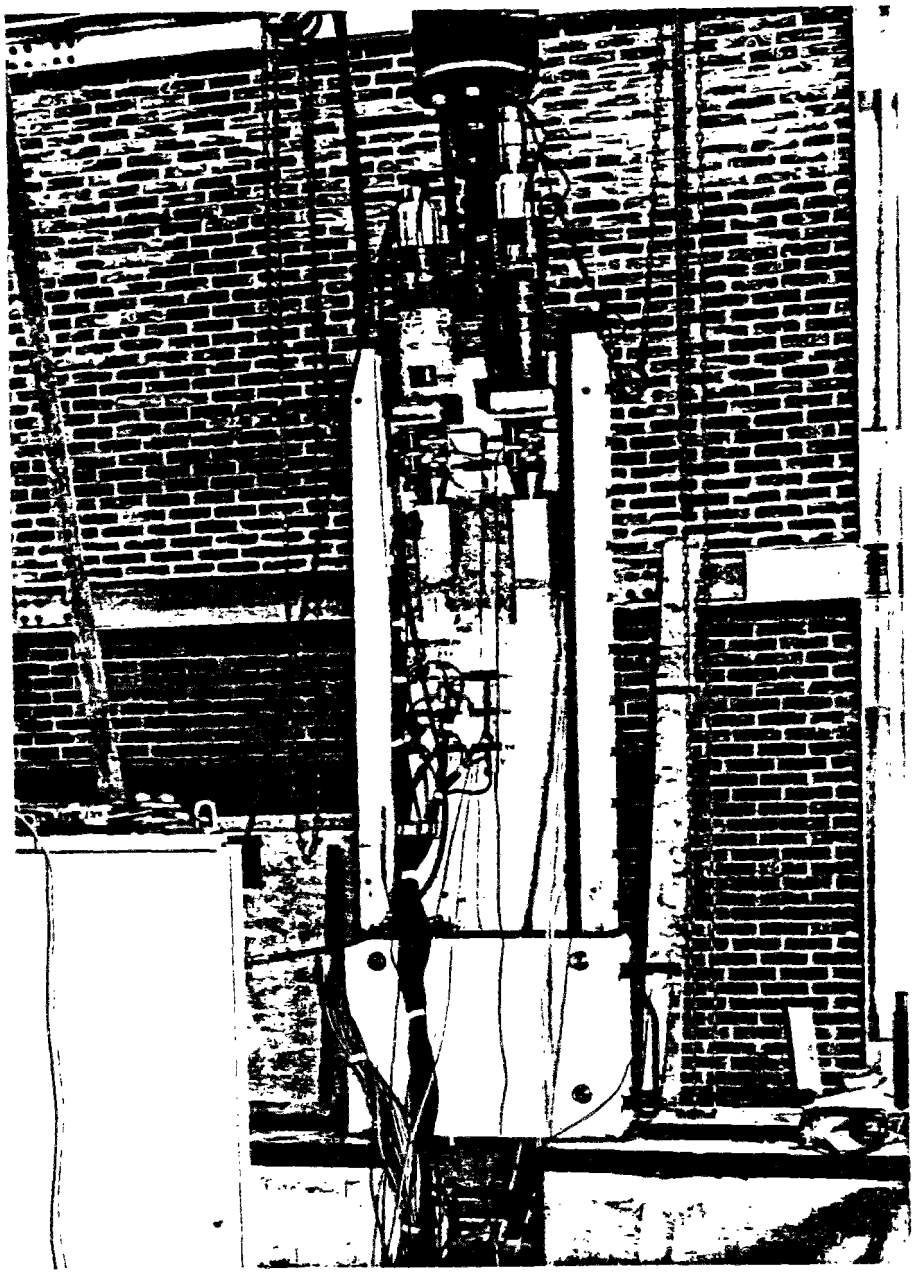


Fig. 4.9 - Vue du dispositif d'essai à deux bossages d'ancrage.

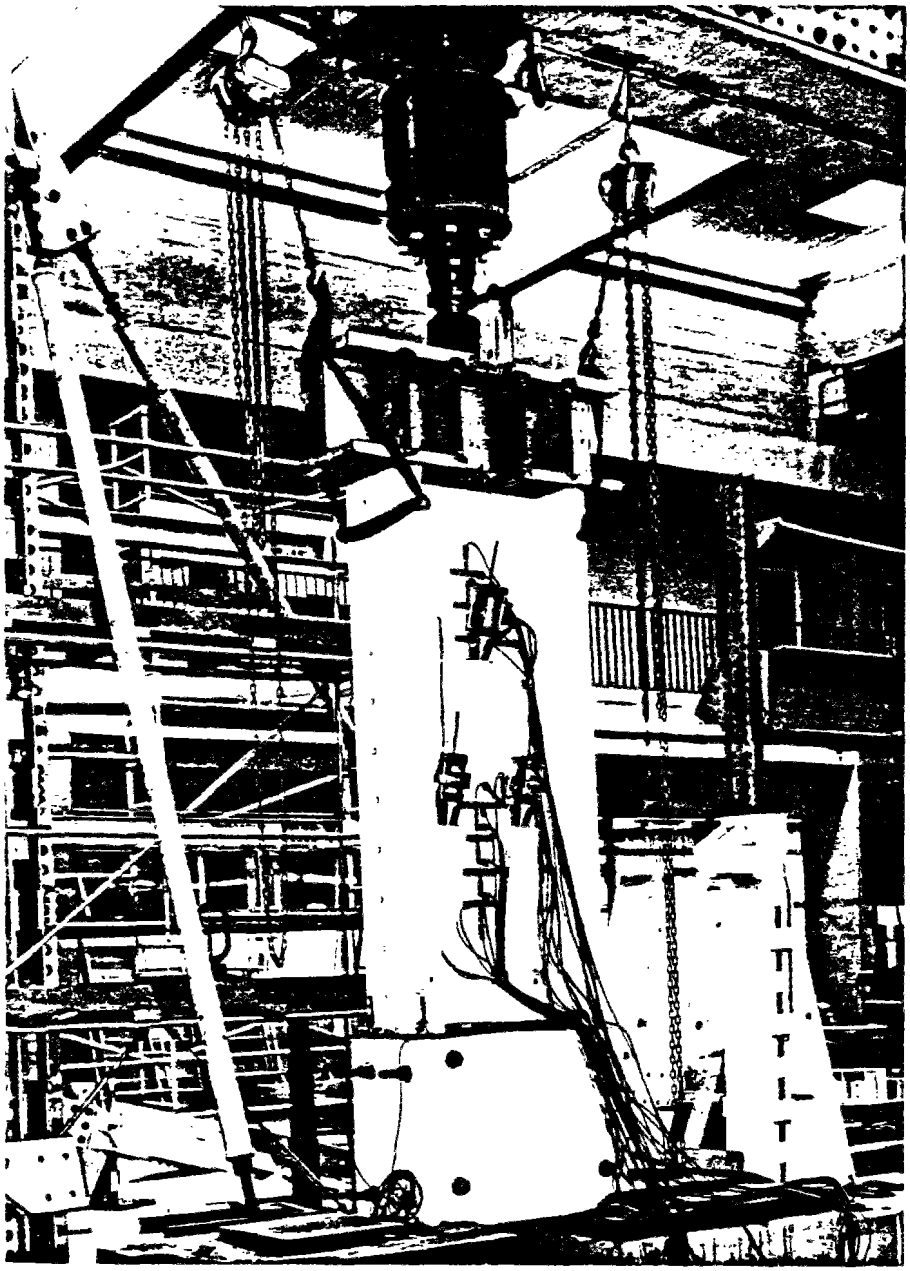


Fig. 4.10 - Vue du dispositif d'essai à trois bossages.

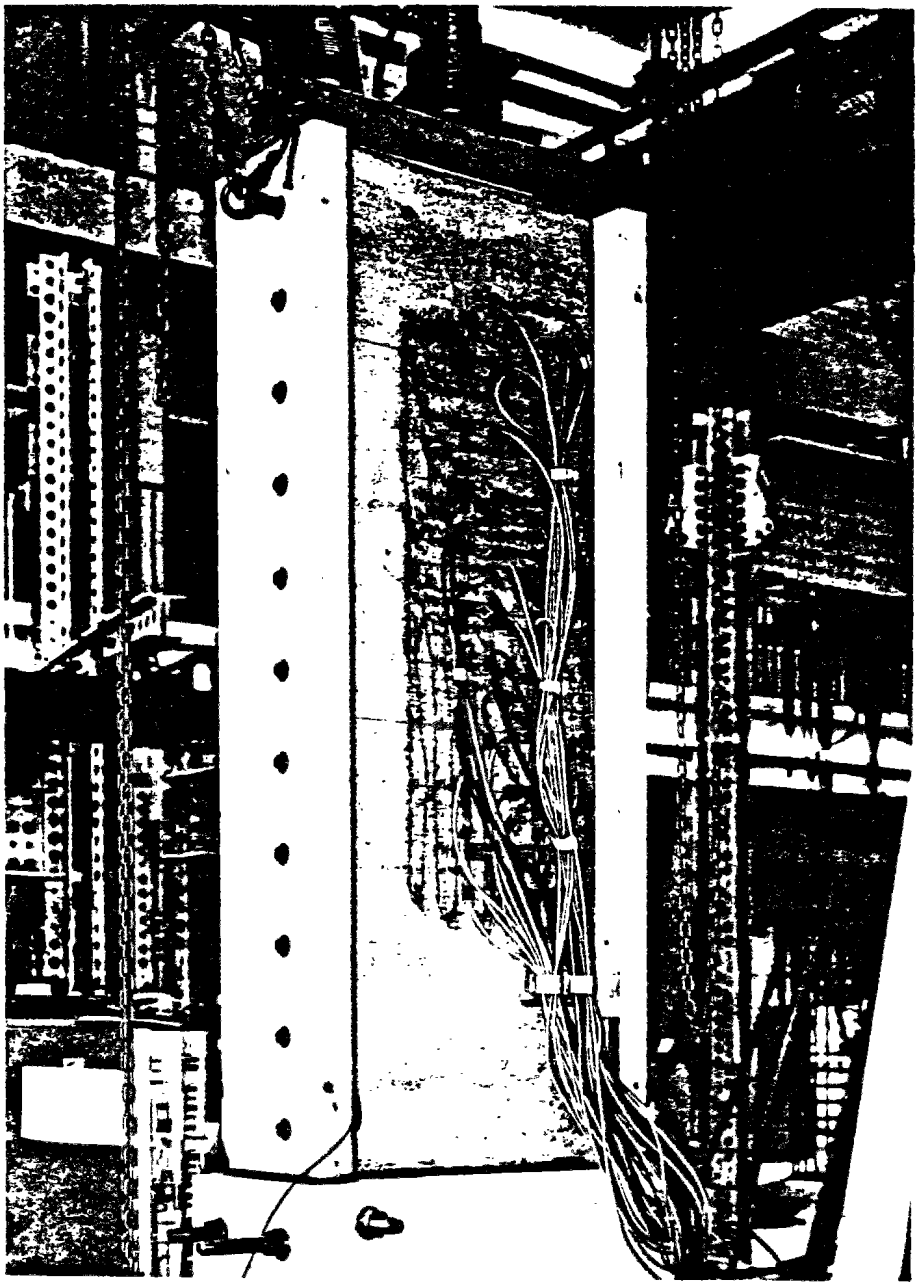


Fig. 4.11. - Vue des jauges sur la face opposée au bossage

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RESULTATS

Dans ce chapitre nous explicitons les résultats obtenus par les deux méthodes théoriques exposées : calcul élastique par la méthode des coupures, et calcul non-linéaire par les éléments finis. Nous ferons ensuite leur comparaison avec les résultats des essais décrits dans le chapitre 4.

5.1. - Résultats obtenus par la méthode des coupures

5.1.1. Cas étudiés

Le programme de calcul automatique rédigé (programme CPC) a permis d'étudier l'influence, sur la répartition des contraintes dans le hourdis, des facteurs suivants :

a) condition d'encastrement des bords latéraux longitudinaux ;
b) rapport de la longueur du bossage sur celle du hourdis (γ) ;
c) longueur du bossage ;
d) dimensions relatives du bossage par rapport à celles du hourdis ;
e) effet de groupement de bossages.

Le tableau 1, résume les différents cas étudiés (voir fig. 5.1) :

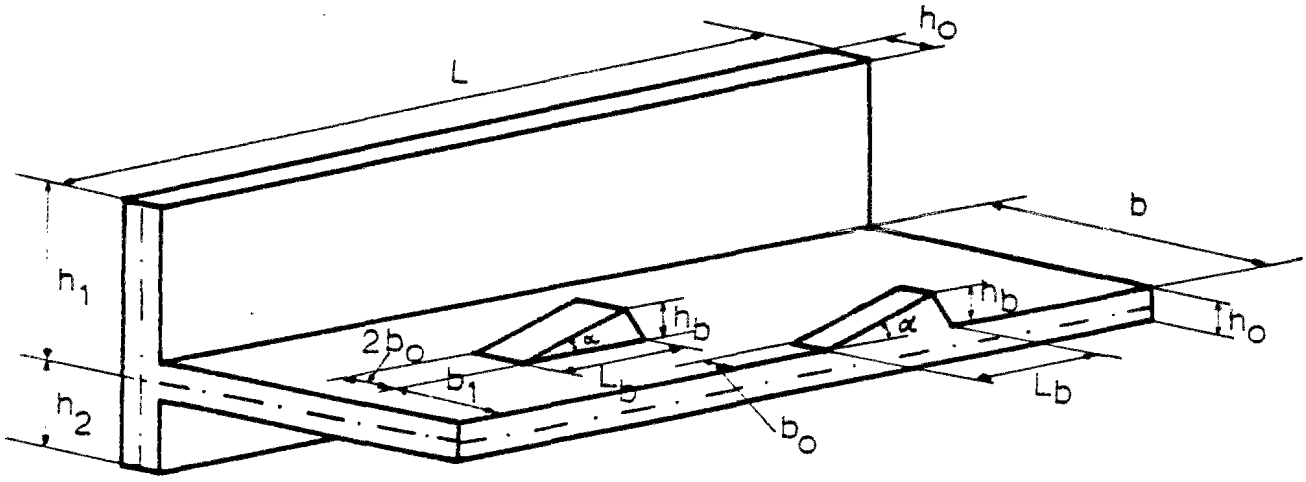


FIG 5.1

TABLEAU 1

CAS	Nombre Bossages	2 bo	2 b	2 b_1	hb	ho	h_1	h_2	Lb	α	Remarques
CP-0	1	24	252		24	18	100	50	120	10.8°	Essais 1974-76
CP-1	1	10	60		8	6	22	10	38	10.7°	Essai série A (γ = 0,166)
CP-2	1	10	60		8	6	0	0	38	10.7°	Egal à CP.1, mais aux bord libres
CP-3	1	10	100		8	6	38	16	38	10.7°	γ =0.10
CP-4	1	10	100		8	6	0	0	38	10.7°	Egal à CP.3, mais aux bords libres
CP-5	1	10	200		8	6	72	34	38	10.7°	γ = 0.05
CP-6	1	10	1000		8	6	0	0	38	10.7°	γ = 0.01
CP-7	1	30	400		30	25	100	50	150	11.3°	
CP-8	1	30	400		30	20	100	50	150	11.3°	
CP-9	1	30	400		30	16	100	50	150	11.3°	On a essayé de différents tracés du cable
CP-10	1	30	400		24	16	100	50	150	9.1°	
CP-11	1	30	400		24	16	100	50	100	13.5°	Egal à CP-10, mais avec Lb plus petite
CP-12	2	10	60	20	8	6	22	10	38	10.7°	Essai série B
CP-13	2	10	60	20	8	6	22	10	38	10.7°	Egal à CP-12, mais aux bord libres
CP-14	3	10	60	20	8	6	22	10	38	10.7°	Essai série C

Les dimensions sont données en cm.

5.1.2. - Influence du rapport γ = bo/b et des conditions d'encastrement.

Les calculs CP-1, CP-3, CP-5 et CP-6, nous permettent de mettre en évidence l'influence de γ. Nous y avons considéré respectivement les valeurs 0.166, 0.10,0.05, et 0.01.

Les cas CP-2 et CP-4, sont identiques respectivement à CP-1 et CP-3, sauf qu'ils ont été calculés en supposant les bords latéraux libres. Ceci pour dégager l'influence de l'encastrement du hourdis latéralement, quand le rapport γ varie.

Lescas CP-0 et CP-1 correspondent, eux, aux essais H01(1974) et HO-A, avec lesquels nous ferons plus loin la comparaison.

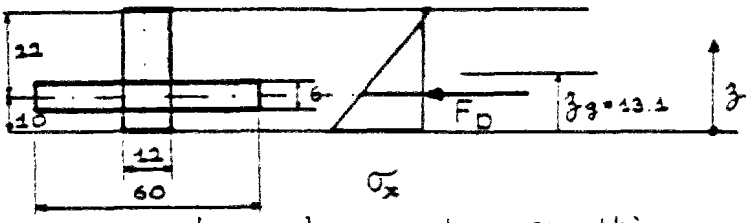
Remarque : Pour rendre homogène la confrontation des résultats, les contraintes seront dans la suite données en valeur relative, rapportée à la pression d'appui : $p_1 = \frac{\text{Précontrainte } (F_p)}{2\ bo\ ho}$

5.1.2.1.- Verification des conditions déquilibre.-

Celle-ci est faite systématiquement à tous les calculs.

A titre d'exemple, nous explicitons ici le cas CP-1 :

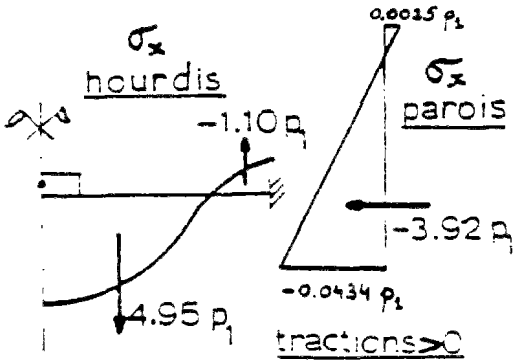
1) Devant et à une distance suffisamment loin de l'ancrage, après diffusion de la précontrainte, nous avons alors la distribution des contraintes de Navier :



z	$\sigma_x/P1$
0	-0.1406(-0.1419)
10	-0.0948(-0.0951)
32	+0.0060(+0.0084)

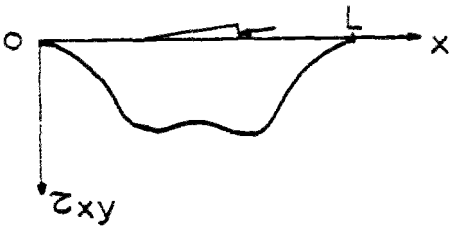
Les valeurs entre-parenthèses, sont celles du calcul obtenues à 97 cm. en avant de l'ancrage. A cette distance, on vérifie aussi que les flexions sont déjà disparues, ainsi que la contrainte transversale σ_y. Le hourdis n'est plus soumis qu'à une compression uniforme σ_x.

2) Derrière l'ancrage, la résultante des contraintes σ_x doit être nulle. Nous avons à 11 cm en arrière du bossage:



Ce qui donne bien : 4.95 ≃ 1.10 + 3.92

3) A l'extrémité inférieure de la pièce (x = 0), nous devons retrouver l'égalité entre l'effort normal des âmes et la résultante des cisaillements à la jonction hourdis-âme.



Ame : $\frac{(-0.1406 + 0.0060)}{2}(p_1 \times 6 \times 32) = -12.92\, p_1$,

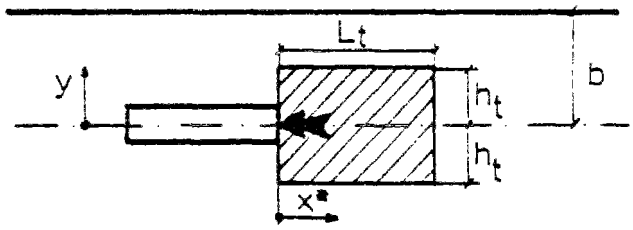
d'autre part, la résultante des cisaillements est :

$\int_0^L \tau_{xy}\, h_0\, dx = 13.06 p_1$. C'est bien vérifié.

5.1.2.2.- Etude des contraintes longitudinales σ_x :

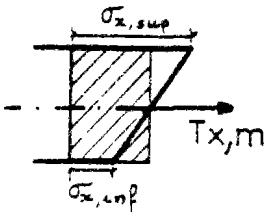
Les figures 5.2 à 5.9 indiquent la variation des contraintes longitudinales σ_x suivant différentes sections longitudinales (fig. 5.2 à 5.5) et transversales (fig 5.6 à 5.9). Nous y avons porté le cas de bords latéraux encastrés CP-1 (en traits forts) et celui où ils seraient libres (en traits fins). Les courbes des autres cas présentent aussi cette allure générale, seules les valeurs numériques diffèrent. D'une façon générale, nous relevons les traits suivants :

A) Derrière le bossage : Il apparait une zone de traction d'entraînement, dont les effets diminuent à mesure que l'on s'éloigne de l'ancrage. A cela intervient aussi une flexion longitudinale (d'axe $\overrightarrow{oy}$) qui tend davantage la face supérieure (côté bossage) du hourdis. Les tractions totales y sont très élevées. Nous avons évalué cette zone à :

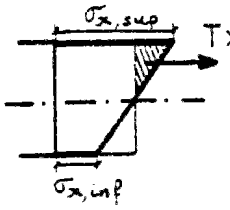


γ	Lt/b	Plan moyen	ht Face supérieure
0.166	1.17(0.74)	0.5(0.4)	0.7 (0.4)
0.100	0.86 (0.83)	0.5 (0.46)	0.7 (0.46)
0.050	0.62	0.5	0.7

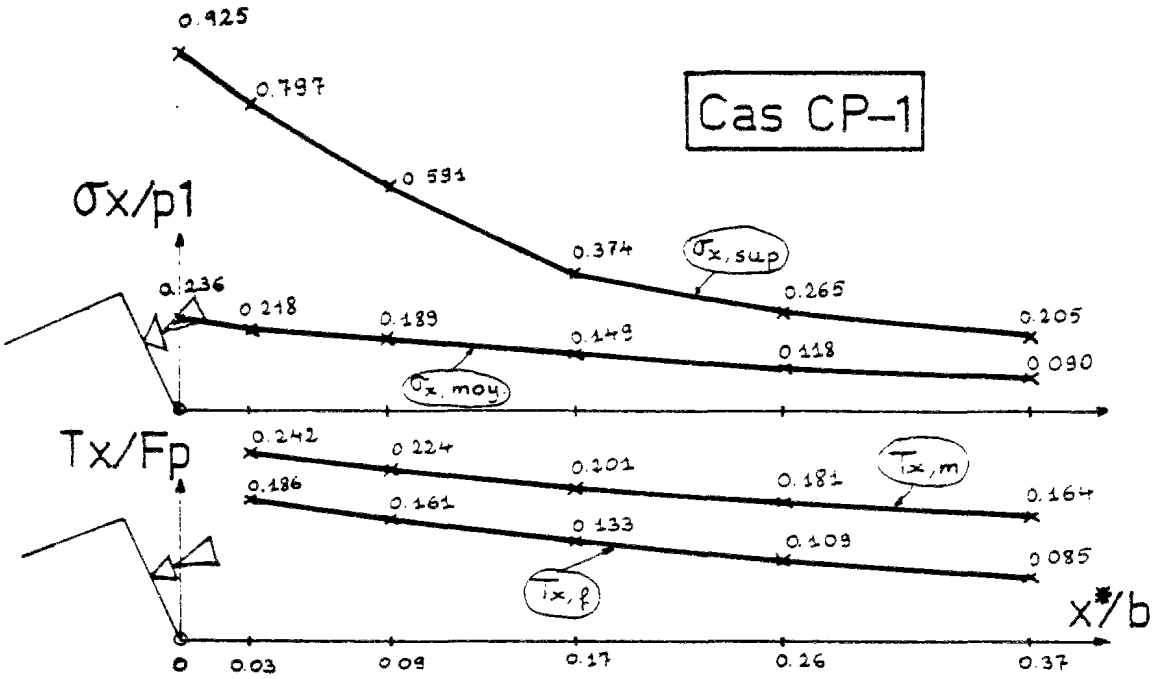
Les valeurs entre-parenthèses, correspondent au cas de bords libres. Quant aux contraintes de traction, nous résumons au schéma suivant son intensité maximale (forcément dans l'axe de la pièce), et leur résultante T_x obtenue par intégration, le long de la section transversale, des volumes des tractions moyennes



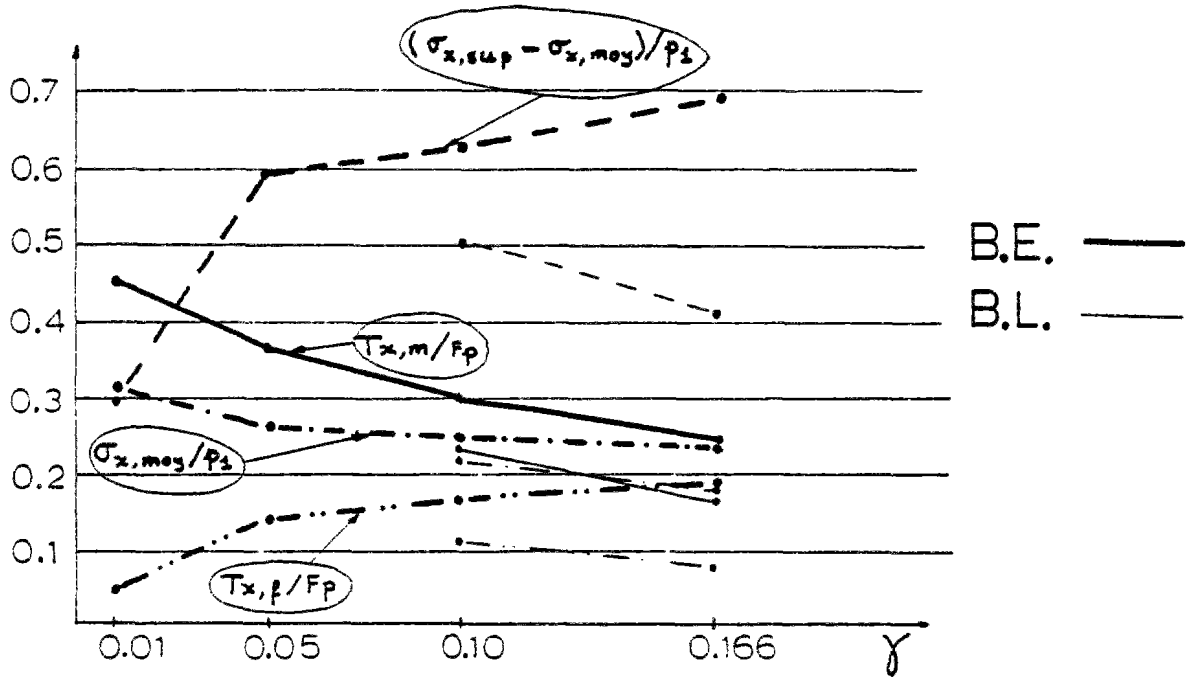
et des flexions



, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du bossage. F_p est la force de précontrainte.



L'évolution, pour différentes valeurs de γ, des contraintes de traction juste derrière le bossage ($x^* = o, y = o$) et de leurs résultantes T_x est la suivante :



(B.E.=bords encastrés ; B.L.=bords libres ; $\gamma = b_0/b$)

De ces résultats, on peut tirer les considérations suivantes :

— Il existe une zone, très localisée juste derrière l'ancrage, soumise à une forte flexion longitudinale qui entraîne de fortes tractions dans la fibre supérieure du hourdis. Ces flexions diminuent rapidement quand on s'éloigne du bossage. Le calcul indique un pic des valeurs $\sigma_{x,sup.}$, qui doit être nettement écrêté en réalité, par suite des hypothèses de calcul dont les limites ont été signalées dans le paragraphe 2.4.

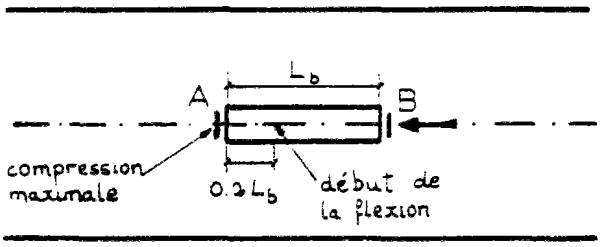
— Quand γ diminue, les tractions moyennes augmentent. Mais la variation reste assez faible pour les valeurs de γ courantes. Par contre, les valeurs des flexions diminuent quand γ décroît (bossage s'éloignant des âmes latérales). La variation est plus forte que celle des tractions moyennes, et s'accentue nettement quand γ devient très petit.

Les valeurs des résultantes des tractions moyennes et des flexions évoluent dans le même sens.

— Les résultats obtenus avec l'hypothèse de bords libres sont nettement du côté de l'insécurité : les contraintes obtenues

sont beaucoup plus faibles et s'annulent plus vite.
Pour γ = 0.166, nous avons estimé une réduction du 35% dans les valeurs de $T_{x,m}$. La réduction est encore plus importante en ce qui concerne les valeurs des flexions, qui se sont avérés très sensibles aux conditions de déplacement vertical des bords : les $T_{x,f}$ obtenues avec les bords libres sont 40% environ des valeurs calculées avec les bords encastrés, et disparaissent complètement pas très loin du bossage (h_t=0.4b par rapport à 0.7b dans le cas en B.E.). En outre, ces flexions augmentent quand γ diminue, au contraire du cas en B.E. où les flèches nulles imposées sur les bords augmentent les flexions quand γ augmente ('b' diminuant et le bossage s'approchant des bords
Les différences entre les résultats obtenus avec les deux hypothèses (B.L. et B.E.) , diminuent rapidement quand le bossage s'éloigne des bords (γ diminue), comme l'on pouvait s'y attendre.

B) <u>Devant le bossage</u> .- Il apparaît une flexion qui tend la fibre supérieure du hourdis, due à la courbure du câble de précontrainte. Cette flexion n'est pas importante, elle reste très localisée autour de l'axe de la pièce et n'entraîne que de très faibles tractions. Elle est d'ailleurs très sensible au tracé du câble dans cette zone là.



—Les compressions sur la fibre moyenne augmentent tout le long du bossage, et atteignent leur maximum à peu près devant le bossage. Au delà, elles diminuent graduellement jusqu'aux valeurs de NAVIER.

—Le tableau ci-dessous montre les valeurs de la compression maximale dans la fibre moyenne (dans l'axe de la pièce), des flexions, et du rapport $\delta = \frac{|\text{compression max. en } A|}{\text{traction max. en } B}$ (fibre moyenne)

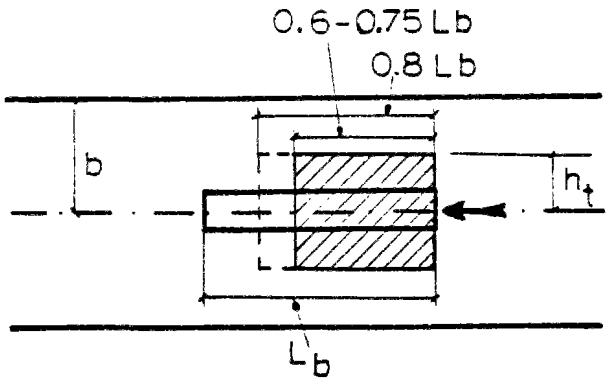
	$\sigma_{x,moy}/p_1$ (en A)		$\frac{(\sigma_{x,sup}-\sigma_{x,moy})}{p_1}$ (en A)		δ	
γ	B.E.	B.L.	B.E.	B.L.	B.E.	B.L.
0.166	-0.181	-0.243	0.203	0.103	0.77	1.37
0.100	-0.163	-0.193	0.209	0.142	0.66	0.90
0.050	-0.150		0.222		0.59	
0.010	-0.250		0.262		0.89	

— Les compressions maximales dans la fibre moyenne ne sont pas très élevées. Cela est dû à la présence du bossage, qui permet une application progressive de la précontrainte sur le hourdis. Elles restent nettement inférieures aux tractions moyennes d'entraînement derrière le bossage (en B). Le fait est d'autant plus marqué que "b" est grand.
L'augmentation des valeurs des compressions obtenues avec l'hypothèse de bords libres, découle de la réduction de la section transversale qui, dans ce cas-là, n'a pas d'âmes latérales.

— Les flexions qui apparaissent ne sont pas importantes et deviennent presque négligeables avec l'hypothèse de bords libres.

— Les compressions maximales diminuent avec γ, au contraire de ce qui se produit dans le cas d'un ancrage noyé, où l'application de la charge n'est pas graduelle : du fait de la présence du bossage, les compressions dues à la partie de la force de précontrainte transmise par le partie postérieure du bossage, se diffusent plus vite quand γ décroît (et donnent par conséquent des valeurs plus petites au point A). Cela explique aussi les valeurs obtenues pour γ = 0.01 où la situation s'approche de celle des ancrages noyés (L_b négligeable par rapport à "b").

C) Le long du bossage . Il apparaît une zone à flexion qui s'étend sur 0.8 Lb à partir de l'ancrage et qui tend la fibre inférieure du hourdis, en y entraînant de fortes tractions sur une longueur de 0.6 à 0.75 Lb. Cette flexion est due, d'une part à l'excentrement du câble, et d'autre part à celui de la ligne de c d.g . du bossage



par rapport à celle du hourdis. La flexion demeure à peu près constante sur toute la longueur affectée, si bien que les tractions les plus fortes se produisent juste devant l'ancrage, où s'accumule l'entraînement produit par la précontrainte transmise par la partie du début du bossage.

—La largeur 'ht' de la zone soumise à des tractions, s'étend sur 0.66 b environ, de part et d'autre de l'axe de la pièce. Pour y=b (fig. 5.5), toutes les contraintes σ_x sont des compressions. Par contre, avec l'hypothèse de bords libres, les courbes obtenues montrent que les tractions dans le fibre inférieure persistent jusqu'aux bords du hourdis (ht = b).

—Les valeurs des tractions maximales dans la fibre inférieure du hourdis pour y = 0 (axe de la pièce) et y = b o (bord du bossage), ainsi que celles de la plus grande résultante des tractions Tx, obtenue par intégration des volumes de tractions suivant différentes sections transversales, sont montrées ci-dessous :

	$\sigma_{x,inf}/p_1(y=0)$		$\sigma_{x,inf}/p_1(y=b_o)$		T_x/F_p	
γ	B.E.	B.L.	B.E.	B.L.	B.E.	B.L.
0.166	0.280	0.281	0.311	0.307	0.120	0.202
0.100	0.310	0.303	0.338	0.331	0.202	0.274
0.050	0.340		0.345		0.285	

Un bossage - Courbes des contraintes longitudinales (σ_x)

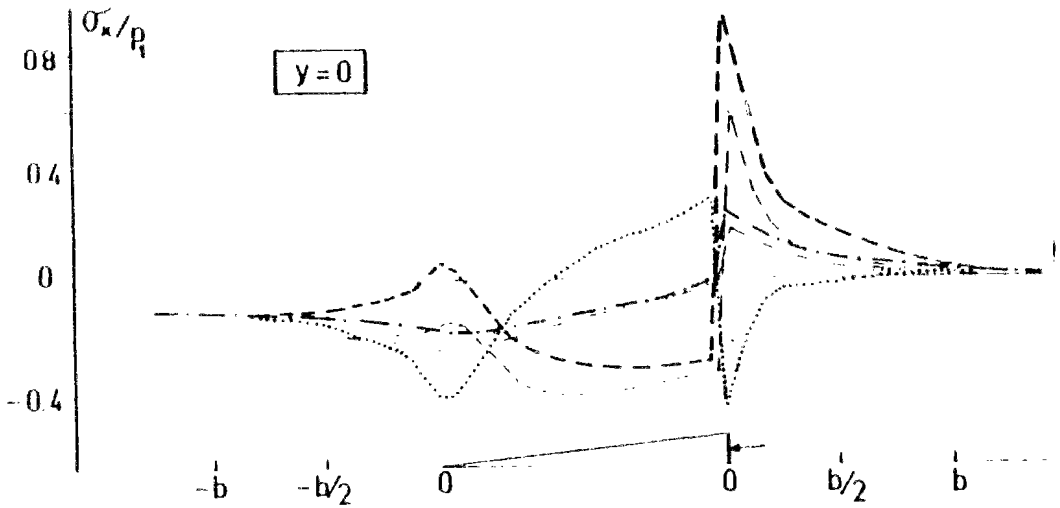


FIG. 5.2

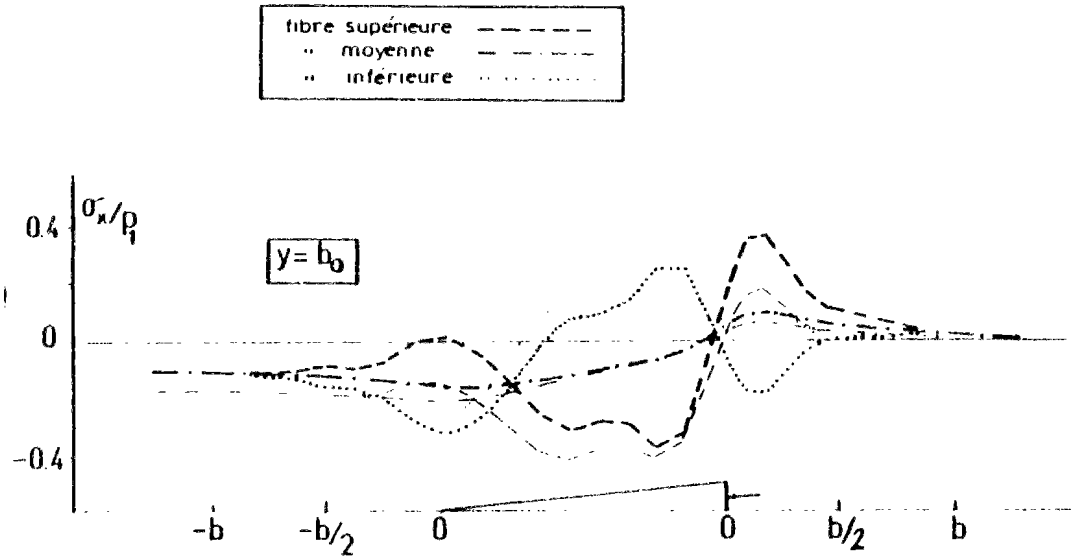


FIG. 5.3

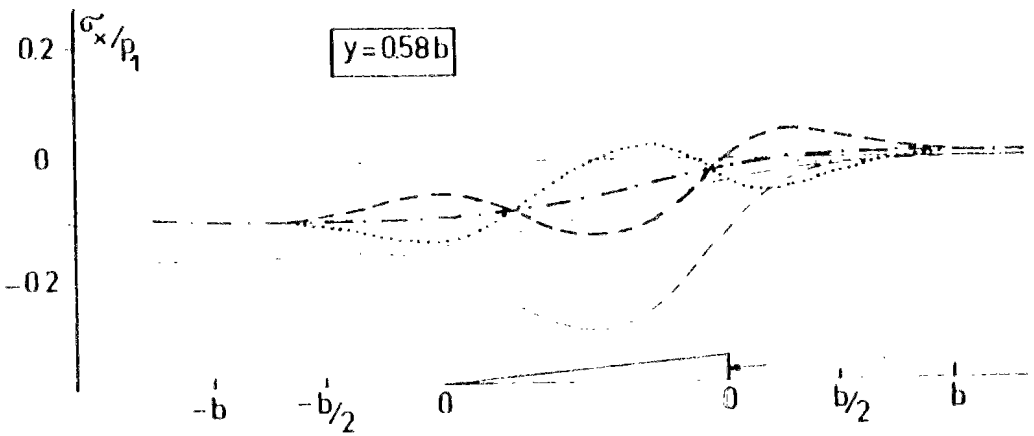


FIG. 5.4

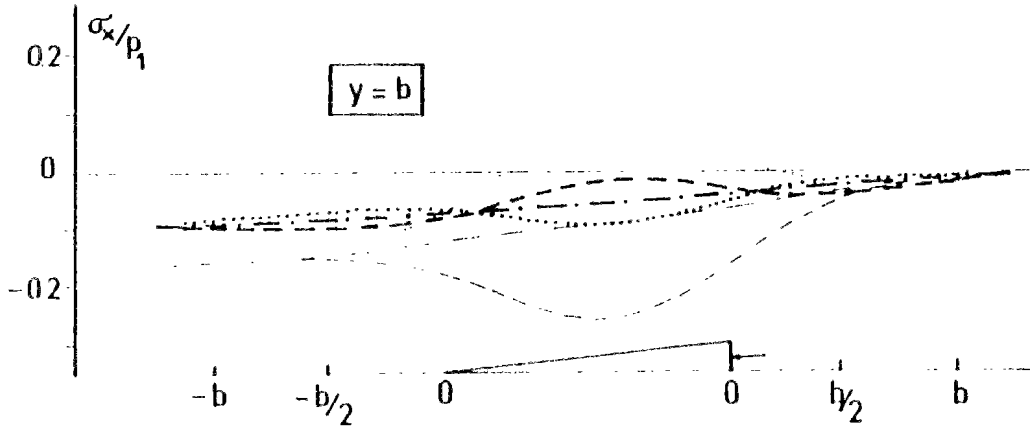
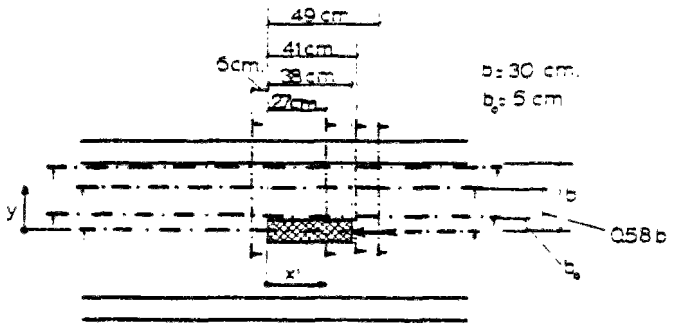


FIG. 5.5

Un bossage - Courbes des contraintes longitudinales

(σ_x)



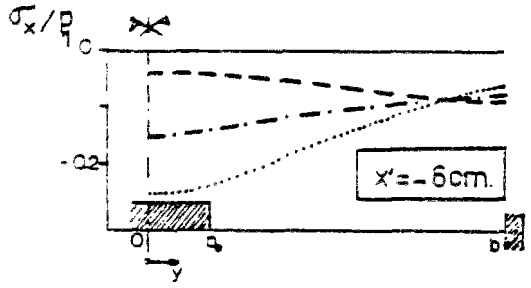


FIG. 5.6

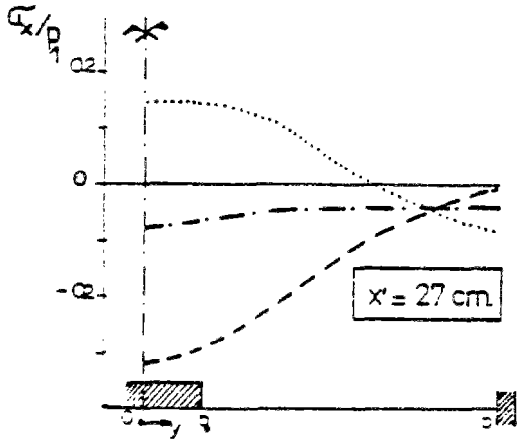


FIG. 5.7

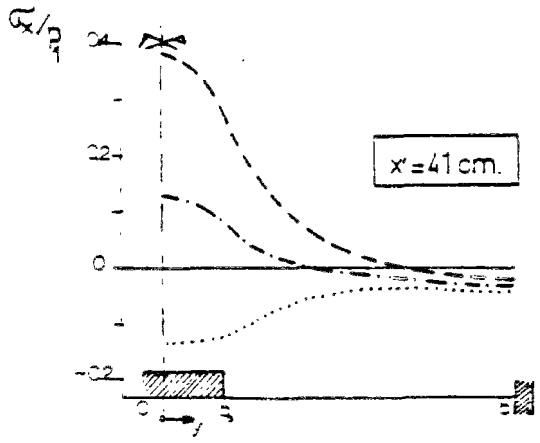


FIG. 5.8

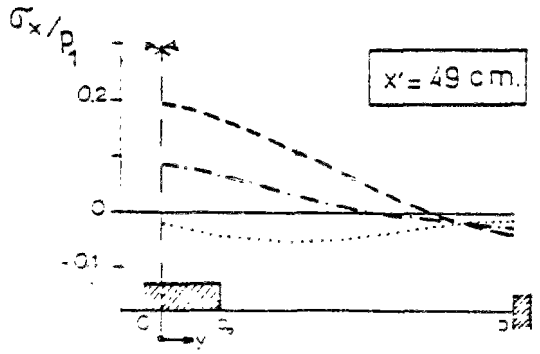


FIG. 5.9

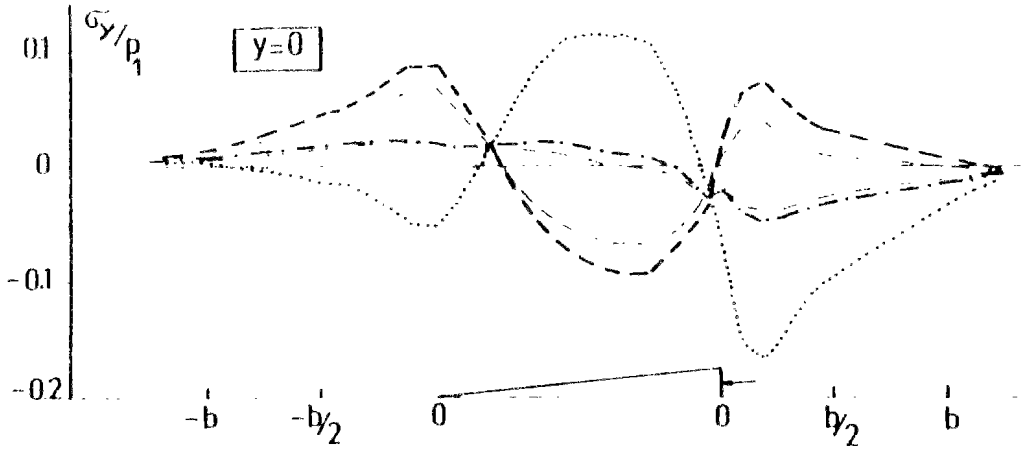


FIG. 5.10

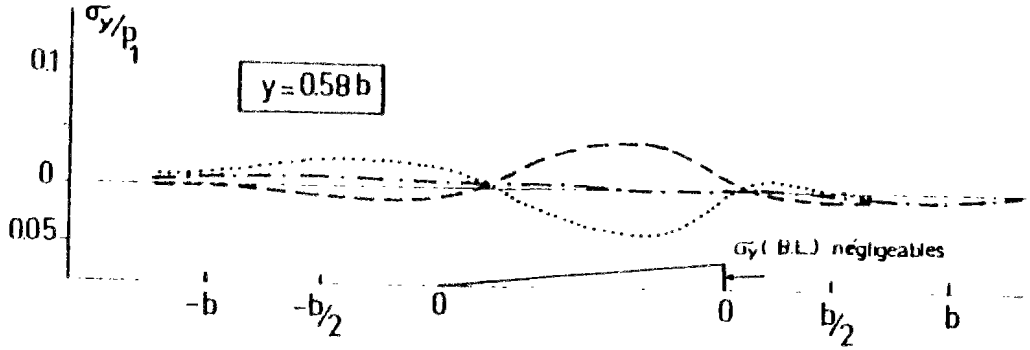


FIG. 5.11

Un bossage - Courbes des contraintes transversales (σ_y)

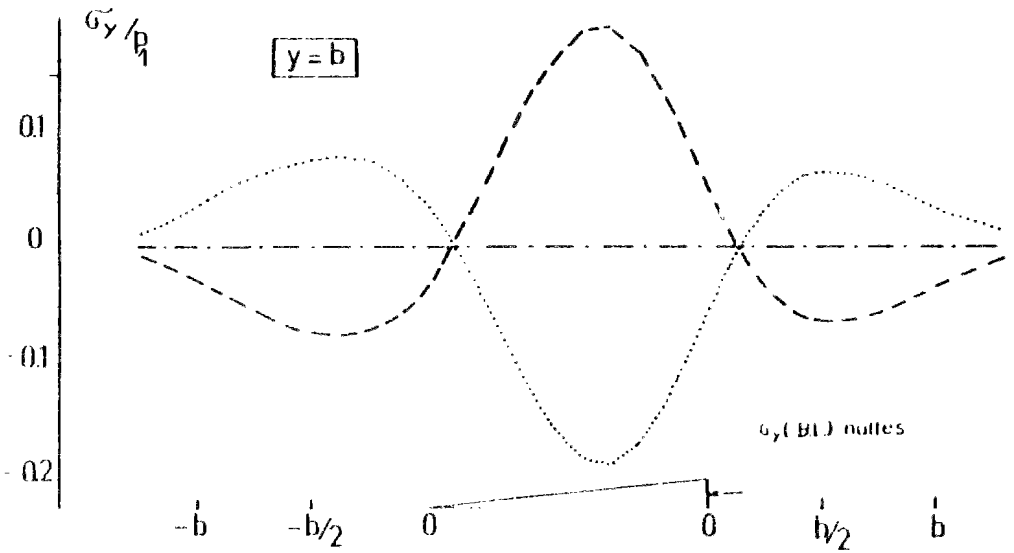


Fig. 5.12

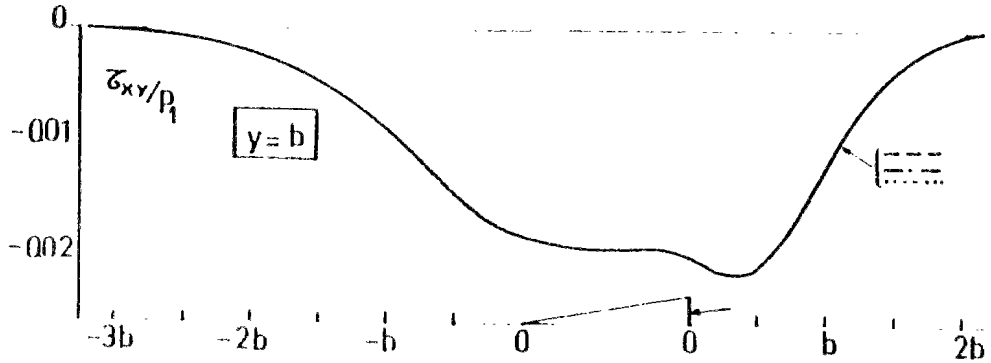


Fig. 5.17

Contraintes de cisaillement le long de la jonction hourdis-parois (τ_{xy})

Un bossage - Courbes des contraintes transversales (σ_y)

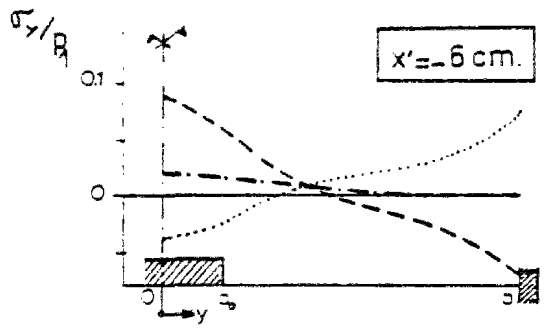


Fig. 5.13

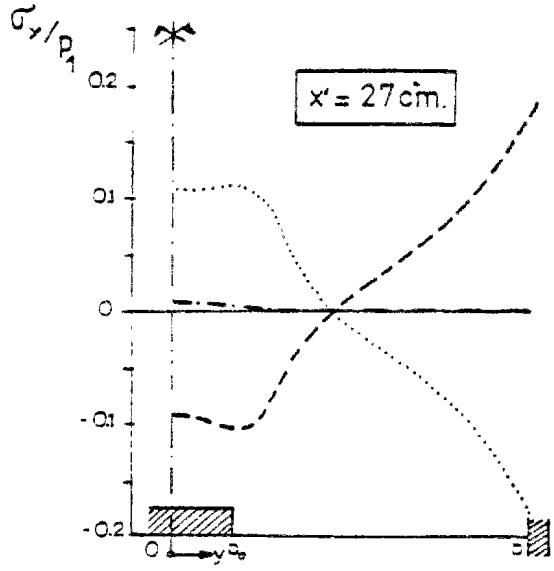


Fig. 5.14

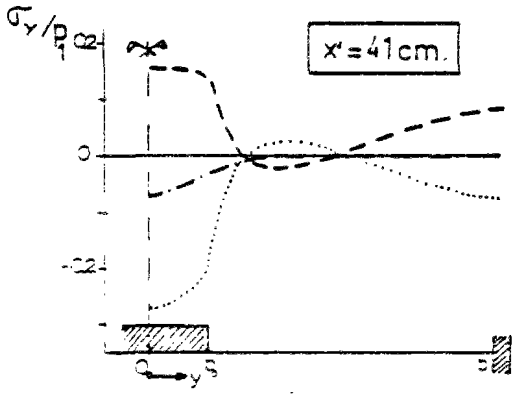


Fig. 5.15

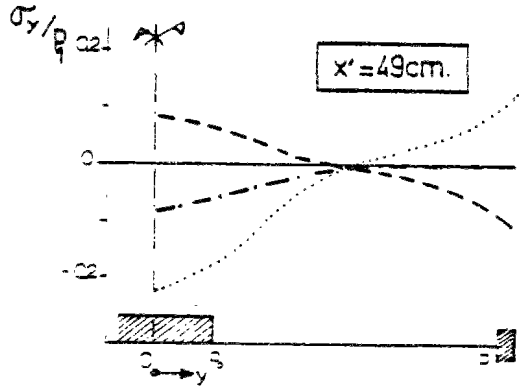


Fig. 5.16

Contraintes longitudinales dans les parois latérales (σ_x)

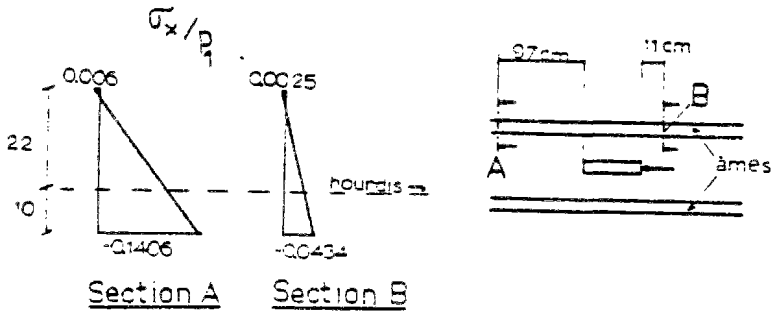


Fig. 5.18

— Quand 'b' augmente, les tractions sur la fibre inférieure augmentent légèrement. Les résultantes Tx augmentent encore plus du fait de l'augmentation de la largeur affectée 'ht'.
Le calcul avec les bords libres donne à peu près les mêmes valeurs des contraintes maximales. La forte augmentation de Tx, est due au fait que dans ce cas, les tractions s'étalent sur toute la largeur du hourdis.

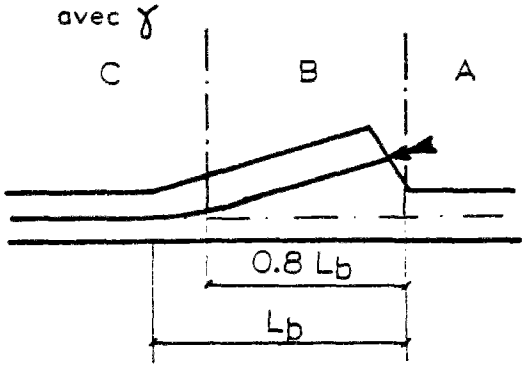
5.1.2.3.- Contraintes transversales σ_y

— Les figures 5.10 à 5.16, montrent les courbes des contraintes transversales σ_y suivant plusieurs sections longitudinales et transversales.

— Sur l'axe de la pièce (y=o), les contraintes σ_y, sur la fibre moyenne, prennent des valeurs positives (tractions) jusqu'à une distance de 0.2 Lb de la fin du bossage. Derrière ce point, ce sont toujours de compression.
La diffusion graduelle entraînée par la présence du bossage, réduit nettement les valeurs des tractions d'éclatement, qui restent faibles et présentent une diffusion très adoucie. On a trouvé une valeur maximale $\sigma_{y,moy.} \simeq 0.024 p_1$ qui n'est influencée ni par γ, ni par les conditions d'encastrement. La résultante T_y des tractions moyennes d'éclatement est aussi faible, entre 0.10 et 0.18 Fp.

— On a décelé la présence de trois zones de flexion transversale :
a) Une première, derrière le bossage, qui met la fibre supérieure du hourdis en traction (zone A)
b) Une seconde, le long du bossage, qui s'étend sur 0.8 Lb à partir de l'ancrage, avec des tractions sur la face inférieure du hourdis (zone B)
c) Une troisième devant le bossage, qui s'étend aussi sur une distance de 0.2 Lb vers l'intérieur du bossage. Elle est très sensible à la courbure du câble, et tend la fibre supérieure du hourdis (zone C)

— La largeur 'ht' de la zone affectée par les tractions, varie avec γ



γ	ht (B.E.)	ht (B.L.)
0.166	0.43b	0.53b
0.100	0.32b	0.36b
0.050	0.20b	

— Les valeurs des tractions transversales maximales dans les trois zones sont :

	$\sigma_{y,max} / p_1$		$\sigma_{y,max} / p_1$		$\sigma_{y,max} / p_1$	
γ	B.E.	B.L.	B.E.	B.L.	B.E.	B.L.
0.166	0.081	0.041	0.170	0.107	0.090	0.073
0.100	0.056	0.046	0.167	0.139	0.080	0.076
0.050	0.040		0.157		0.066	
	ZONE A		ZONE B		ZONE C	

— L'hypothèse de l'annulation des rotations transversales ($\varphi_y = 0$) le long des bords, que nous avons adopté, entraîne l'apparition de fortes flexions transversales à l'encastrement (fig.5.12).
Ces flexions diminuent nettement quand 'b' augmente.
Dans la réalité, où une certaine rotation φ_y existe, ces flexions seront necessairement moins fortes.

5.1.2.4. - Etat de contraintes dans les parois latérales.

La figure 5.17 montre le cisaillement le long de la ligne de jonction hourdis-parois. La figure 5.18 donne les contraintes longitudinales σ_x dans les parois, pour deux sections transversales : l'une devant le bossage, quand la précontrainte est déjà diffusée, et qui correspond à la distribution de Navier ; l'autre située derrière le bossage.
La distribution des contraintes σ_x dans les parois latérales, suit une loi linéaire, où seule la grandeur des contraintes varie.

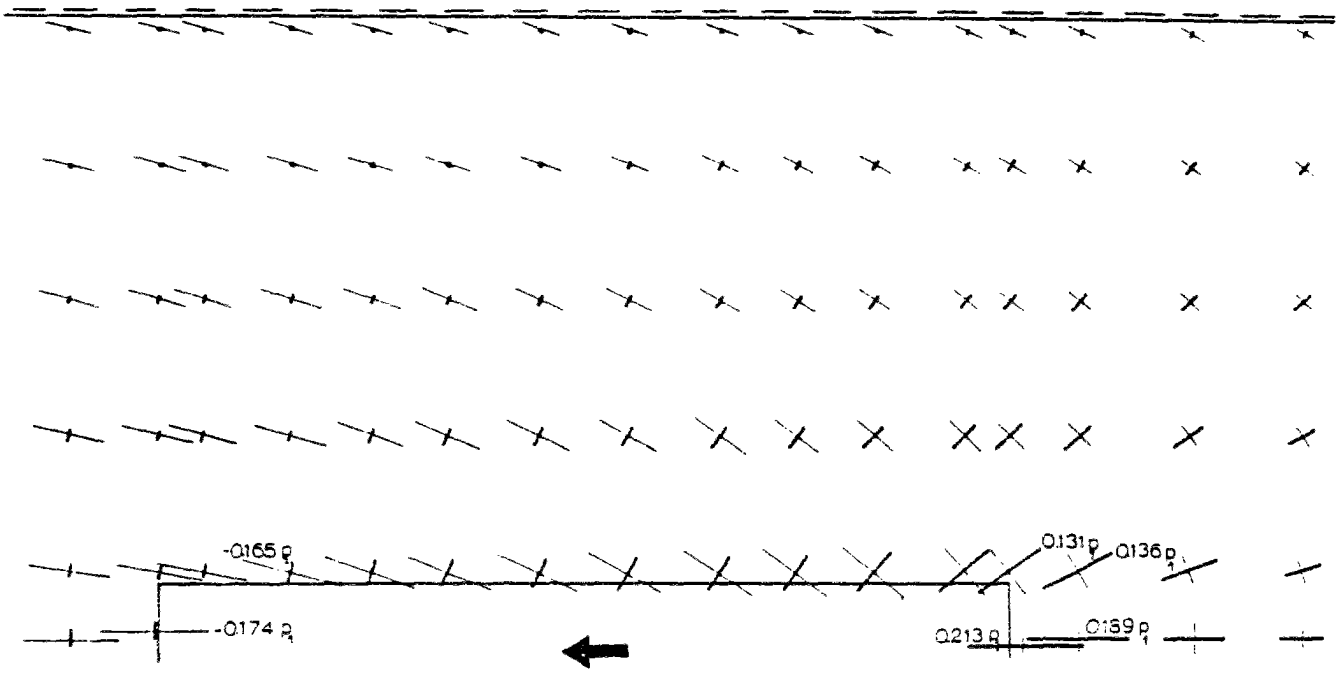


Fig. 5.19 - Fibre moyenne

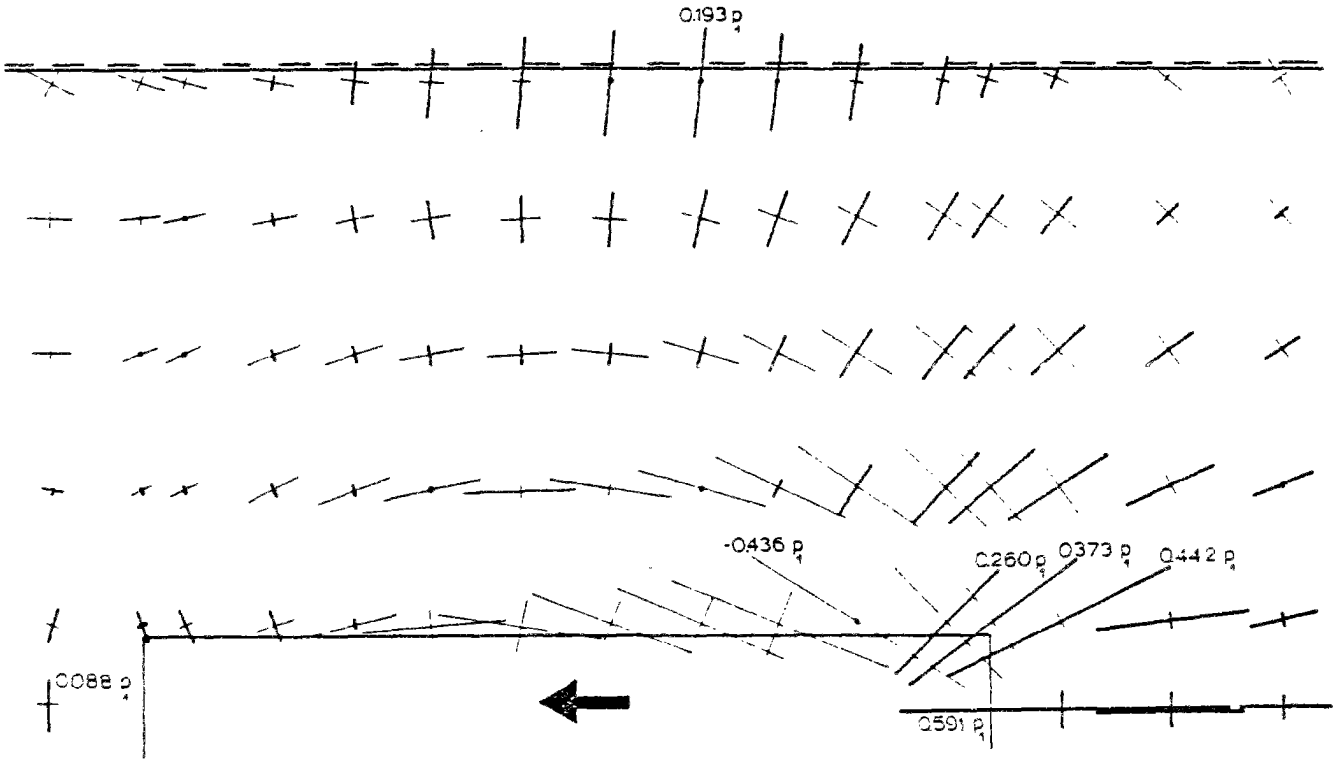


Fig. 5.20 - fibre supérieure

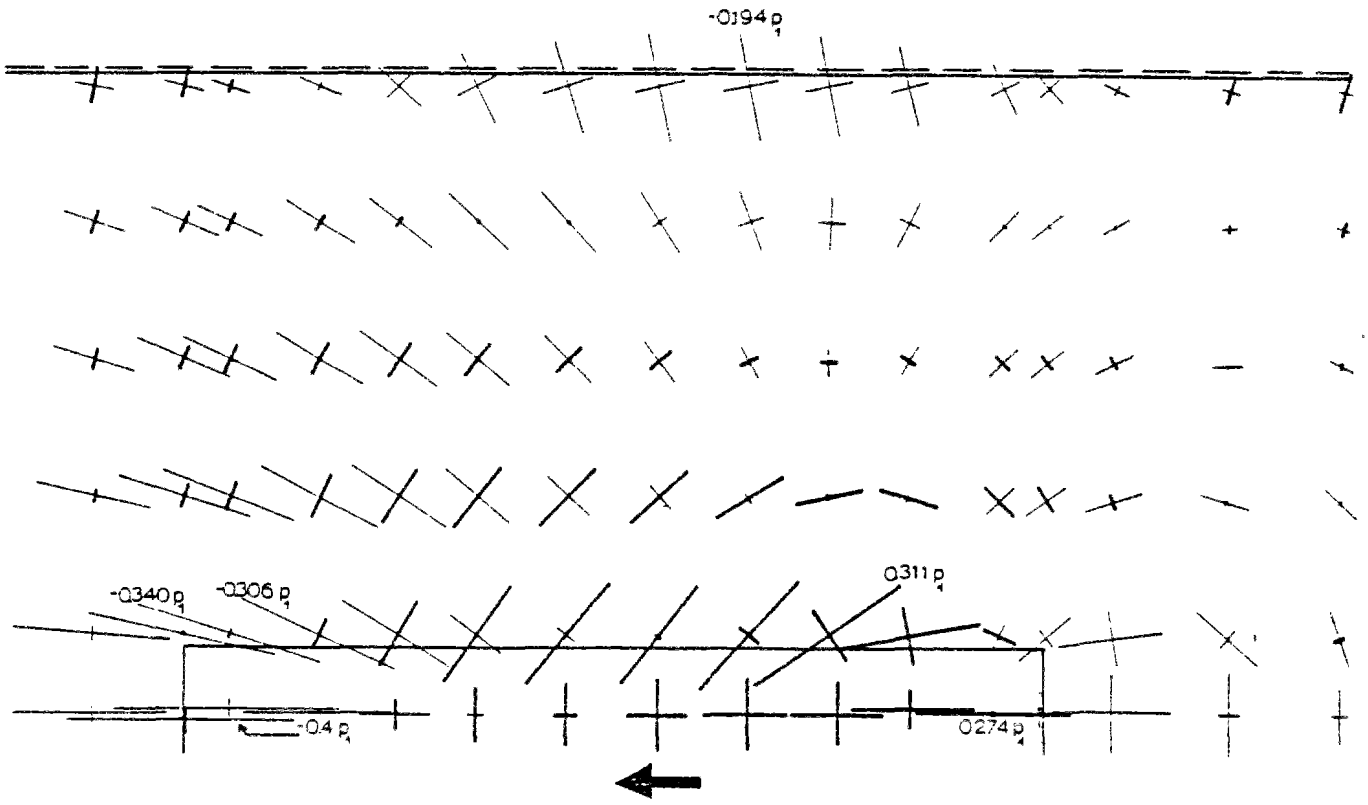
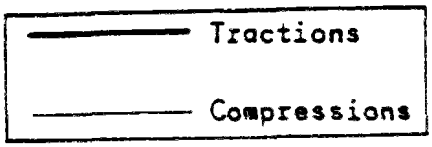


Fig. 5.21 - Fibre inférieure



Un bossage - Diagrammes des contraintes principales

5.1.2.5. - Diagrammes de contraintes principales :

Les figures 5.19 à 5.21, montrent les distributions des contraintes principales, dans le cas CP-1, pour les fibres moyenne , supérieure et inférieure.

— La fibre moyenne du hourdis (5.19), est toujours sollicitée en traction-compression.

La transmission de la précontrainte du bossage au hourdis, se fait par deux mécanismes principaux : cisaillement le long des bords latéraux du bossage, et entraînement de la zone derrière l'ancrage. Elle a lieu très graduellement, et est en grande partie accomplie devant le bossage. Les compressions restent donc modérées avec un léger maximum à l'avant du bossage, et les tractions transversales (ou d'éclatement) sont assez faibles. Par contre, des tractions appréciables apparaissent aux bords du bossage avec une pointe juste derrière l'ancrage où s'accumulent les effets dus à la discontinuité géométrique qui y existe.

— Les distributions concernant les fibres extrêmes montrent les trois zones de flexion citées auparavant :

a) Devant le bossage, avec une décompression longitudinale de la fibre supérieure, laquelle est aussi sollicitée transversalement en traction.

b) Derrière le bossage, une zone critique où la fibre supérieure subit de très fortes tractions longitudinales et d'autres, plus faibles, transversales.

c) A l'intérieur du bossage, il apparaît une autre zone critique, où la fibre inférieure est fortement sollicitée en traction. Les tractions les plus grandes, apparaissent le long des bords du bossage ($y = bo$) et à une distance de $0.25 L_b$ environ de l'ancrage. Là, le béton est en bitraction et la direction des tractions maximales forme un angle de 35° environ avec l'axe de la pièce.

Toutes ces flexions présentent de très brusques variations, surtout à proximité de la discontinuité géométrique de la fin du bossage.

— Aux bords de la pièce, on voit de fortes flexions transver-

sales. Cela vient de l'hypothèse d'impossibilité des rotations ($\varphi_y = 0$), que nous avons adoptée .

Les calculs faits avec d'autres valeurs de γ , montrent que ces flexions diminuent rapidement quand le bossage s'éloigne des bords.

— Les diagrammes obtenus avec l'hypothèse de bords libres (cas CP-2), que nous ne montrons pas, présentent par rapport à ceux du cas CP-1, les mêmes variations qui ont été signélées lors de l'analyse des contraintes σ_x et σ_y : les flexions devant et derrière l'ancrage sont plus faibles et disparaissent rapidement. Par contre, la flexion de la zone centrale du bossage s'étale transversalement sur toute la largeur de la pièce. Cette flexion entraîne des tractions, dans la fibre inférieure du hourdis, qui arrivent jusqu'aux bords de la pièce.

— Il faut aussi noter que des tractions importantes existent dans des zones où le béton est sollicité en compression - traction, et sa résistence ultime est, par conséquent, nettement plus faible que la valeur en compression uniaxiale βp.

5.1.3.-Influence de la longueur du bossage.-

L'étude des cas CP-10 et CP-11, où seule la longueur du bossage a été modifiée (Lb=150 cm en CP-10, et Lb=100 cm en CP-11) nous permet de dégager son influence :

— Dans la zone soumise à des tractions d'entraînement, la diminution de Lb augmente la longueur de diffusion Lt, ainsi que les contraintes maximales de traction dans la fibre moyenne, et leur résultante.

Par contre, les flexions diminuent avec Lb, à cause de la réduction de la zone du bossage affectée par les excentrements du câble.

Lb	Lt	$\sigma_{x,moy}/p_1$	$T_{x,m}/F_p$	$\sigma_{x,sup}/p_1$	$T_{x,f}/F_p$	$(\sigma_{x,sup}-\sigma_{x,moy})/p_1$
100 cm	0.77b	0.237	0.318	0.670	0.103	0.433
150 cm	0.68 b	0.217	0.293	0.740	0.146	0.523

Toutes ces variations restent cependant faibles.

— Devant le bossage, on aperçoit une influence nette de la variation de Lb, sur les valeurs des contraintes :

L_b	$\sigma_{x,moy}/p_1$	$\sigma_{y,moy}/p_1$	δ
100 cm	- 0.196	0.025	0.83
150 cm	- 0.151	0.017	0.70

$$\delta = \frac{\text{Compression max.devant le bossage}}{\text{traction max.derrière le bossage}}$$
(fibre moyenne)

La diminution de la longueur du bossage et, par conséquent, l'application plus brusque de la charge, entraîne une forte augmentation des compressions devant le bossage. De même, les tractions transversales d'éclatement σ_y augmentent brusquement quand Lb diminue, tout en demeurant cependant faibles.

— Les valeurs des flexions longitudinales et transversales devant et à l'intérieur du bossage sont à peine affectées par sa longueur Lb.

5.1.4. - Influence des dimensions relatives bossage-hourdis et de l'excentrement du câble.-

— L'analyse des résultats des cas CP-7 à CP-10, qui comportent des variations des épaisseurs du hourdis (ho) et du bossage (hb), ne nous permet pas de dégager une correspondance claire entre les dimensions relatives du bossage et du hourdis, et les flexions calculées.

En effet, nous avons constaté que c'est plutôt l'excentrement du câble par rapport à la ligne des centres de gravité des sections, qui a une influence sur les valeurs des flexions.

— Cela nous a emmené à étudier, pour une même épaisseur du hourdis (16 cm), deux hauteurs de bossage différentes : 24 cm (CP-10) et 30 cm (CP-9) et ce dernier cas, avec deux tracés du câble différents (CP-9A et CP-9B) :

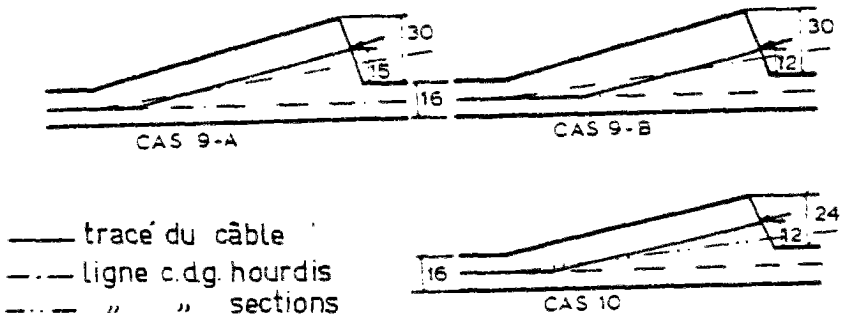


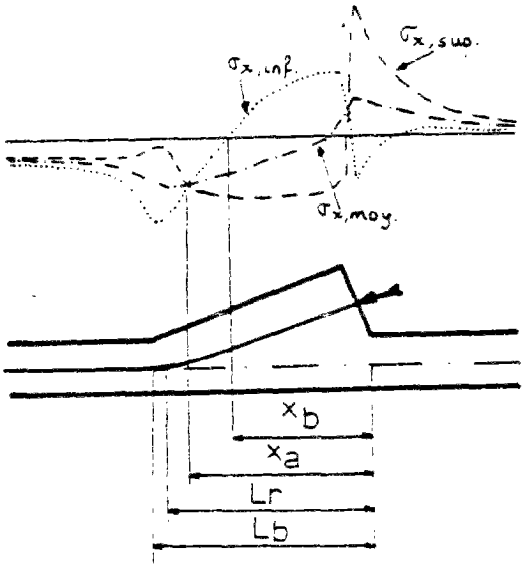
Fig.5.22

— Dans la zone des tractions d'entraînement, nous avons obtenu les valeurs suivantes :

CAS	$\sigma_{x,moy}/p_1$ $(y=0)$	Tx,m/Fp	$\sigma_{x,sup}/p_1$ $(y=0)$	$\frac{(\sigma_{x,sup}-\sigma_{x,moy})}{p_1}$ $(y=0)$	Tx,f/Fp
CP-10	0.217	0.293	0.740	0.523	0.146
CP-9A	0.215	0.292	0.583	0.368	0.098
CP-9B	0.233	0.302	0.540	0.310	0.077

Nous remarquons que les tractions moyennes changent à peine, mais les flexions s'avèrent très sensibles aux excentrements.

— Quant aux flexions à l'intérieur du bossage, les tractions obtenues dans la fibre inférieure du hourdis varient plus :



CAS	$\sigma_{x,inf}/p_1$ $(y=0)$	Tx,f/Fp
CP-10	0.226	0.192
CP-9A	0.157	0.134
CP-9B	0.119	0.112

— La longueur de la zone soumise à cette flexion (Xa), ainsi que celle où des tractions apparaissent sur la fibre inférieure (Xb), sont très sensibles au tracé du câble et à son point de raccord sur la fibre moyenne du hourdis (Lr).

CAS	Lr/Lb	x_a/Lb	x_b/Lb
CP-10	0.85	0.75	0.64
CP-9A	0.75	0.67	0.57
CP-9B	0.70	0.63	0.52

— De cette étude, nous pouvons dégager deux conclusions importantes :

1. - La comparaison des résultats des cas CP-9B et CP-10 montre que, pour une épaisseur du hourdis donnée (ho), une augmentation de la hauteur du bossage (hb) diminue l'excentrement du câble par rapport à la ligne des c.d.g. des sections, et entraîne donc une réduction très nette des valeurs des flexions au milieu et derrière le bossage.

Les cas CP-9A et CP-9B, montrent que l'ancrage, dans la mesure du possible, ne doit pas être centré dans le bossage (CP-9A), mais placé le plus proche possible du hourdis (CP-9B).

2. - Les flexions dans la partie devant du bossage sont très sensibles au tracé du câble dans la zone de raccord sur la fibre moyenne du hourdis. Le cas CP-9B est le plus favorable. Il en découle que la raccord doit être réalisé à l'intérieur du bossage ($L_r < L_b$), ce qui évite l'apparition de tractions longitudinales, dans la fibre supérieure du hourdis, devant le bossage. En même temps, cela permet d'augmenter l'enrobage du câble dans une zone où la poussée au vide est importante.

5.1.5.- Effet du groupement de bossages

5.1.5.1. - Deux bossages.

—Nous l'avons étudié avec l'hypothèse de bords encastrées (CP-12) et de bords libres (CP-13). Le cas CP-12 correspond aux essais Ho-B, avec lesquels nous ferons plus loin la comparaison.

Aux figures 5.23 à 5-34 nous montrons les allures des contraintes σ_x et σ_y, suivant différentes sections longitudinales et transversales. Sur les courbes longitudinales sont montrés, en traits fins, les résultats obtenus avec les bords libres.

Les figures 5.35 à 5.37 présentent les contraintes principales

obtenues respectivement, dans les fibres moyenne, supérieure et inférieure du hourdis.

—Les bossages étant très proches des parois, les conditions de bords ont ici une grande influence et les résultats obtenus avec l'hypothèse de bords libres se situent déjà fort loin de la réalité : des trois zones de flexion longitudinale, seule la centrale reste accentuée et les deux restantes apparaissent très faiblement, uniquement à proximité de l'axe du bossage.

—Avec l'hypothèse de bords encastrés, les trois zones de flexion longitudinale subsistent sur toute la largeur du hourdis.

Des tractions longitudinales importantes apparaissent sur la fibre supérieure derrière l'ancrage, et sur la fibre inférieure à l'intérieur du bossage. Ces tractions persistent sur toute la zone entre les deux bossages et disparaissent rapidement quand on s'approche des bords. Le long de la ligne de jonction hourdis-parois, les σ_x sont toujours négatives (compressions).

—Les allures des courbes de contraintes ne s'éloignent pas trop de celles obtenues pour un bossage. Les nettes augmentations des flexions transversales (fig 5.34) sont dues uniquement au fait que le bossage est ici beaucoup plus près des bords, où nous avons imposé des rotations transversales nulles.

—Les principaux résultats numériques sont les suivants :

	Derrière le bossage	A l'intérieur du bossage	Devant le bossage
$\sigma_{x,moyenne}$ maximale	0.203pl (traction)		-0.251pl (compression)
σ_x (traction)max.	0.905pl (fibre sup.)	0.230pl (fibre inf.)	
Flexion$(\sigma_{x,sup} - \sigma_{x,inf})$	0.702pl		0.215pl
Résultante Tx,m (tractions moyennes)	0.236 Fp		
Résultante Tx,f (flexions)	0.167Fp (fibre sup.)	0.088Fp (fibre inf.)	

Deux bossages - Courbes des contraintes longitudinales (σ_x)

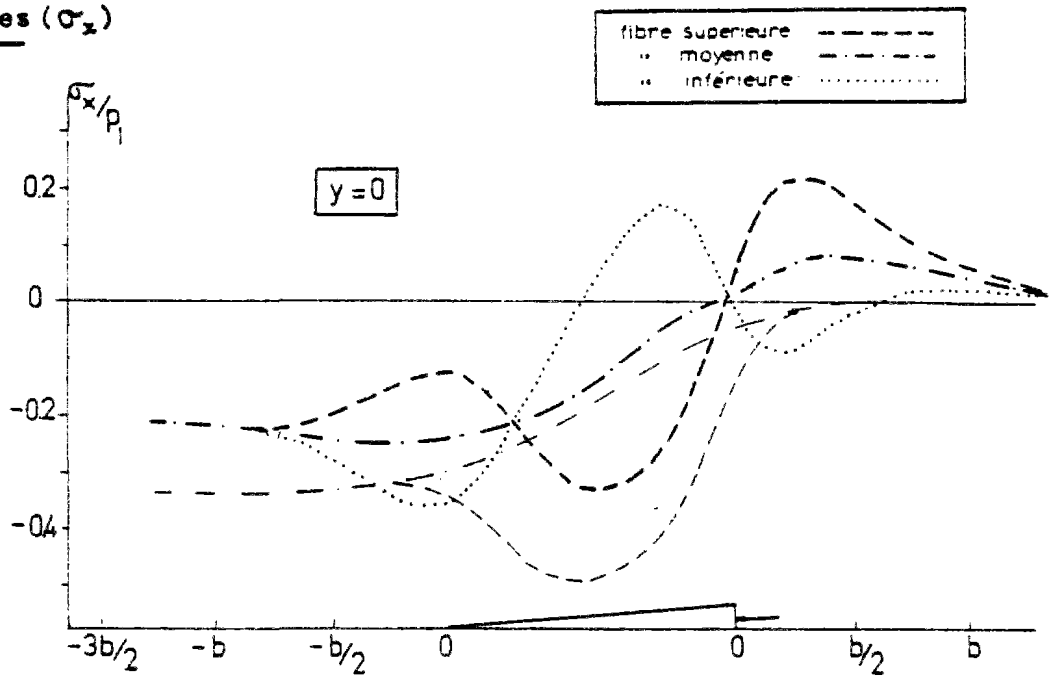


Fig. 5.23

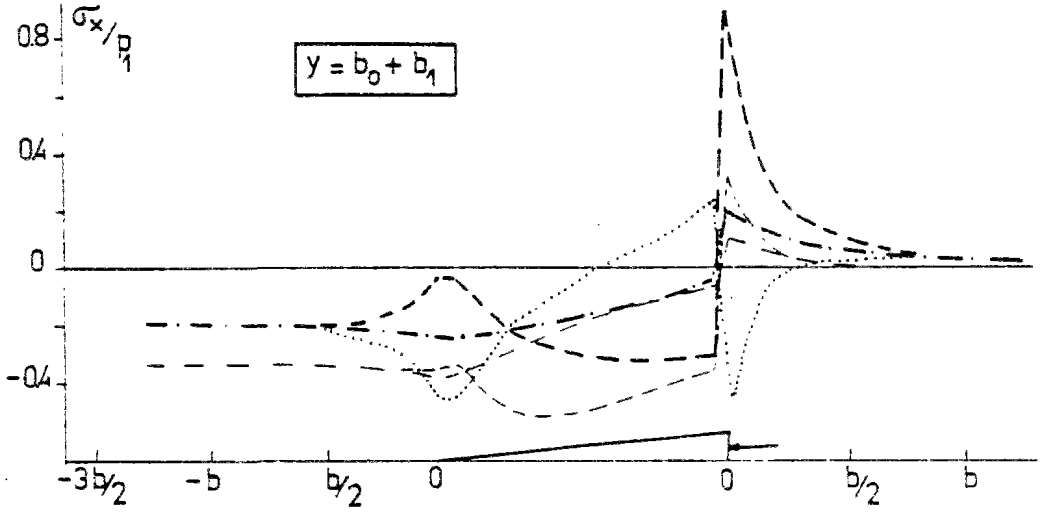


Fig. 5.24

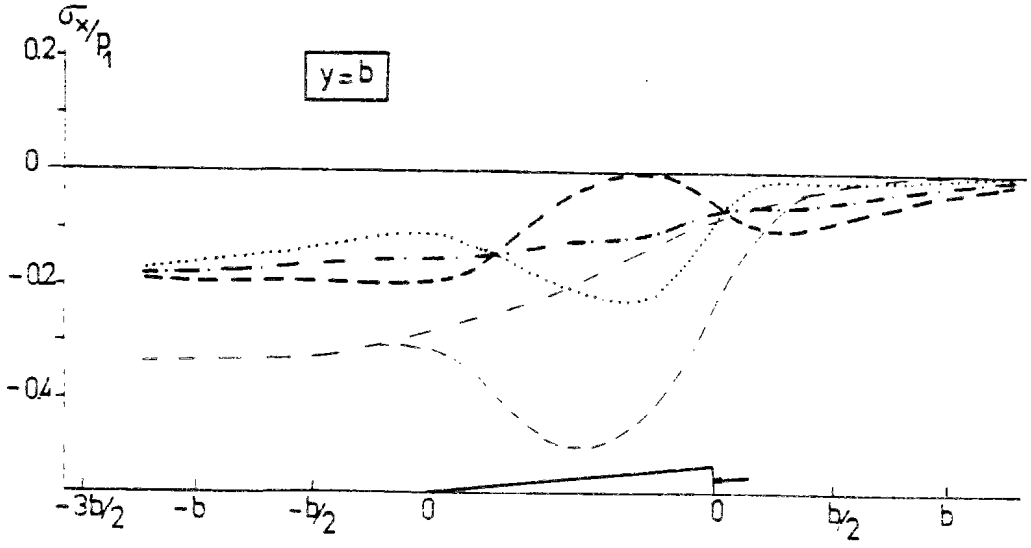
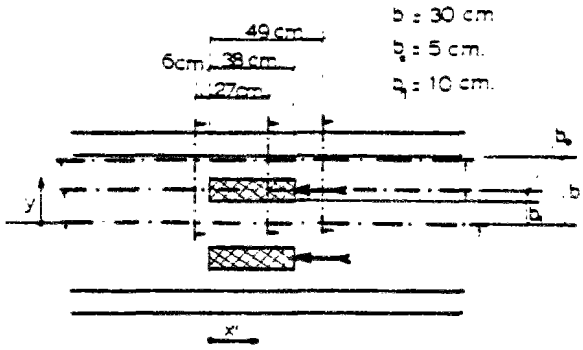


Fig. 5.25

Deux bossages - Courbes des contraintes longitudinales et transversales



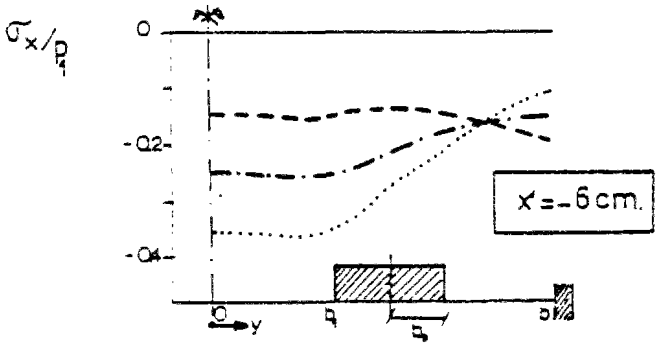


Fig. 5.26

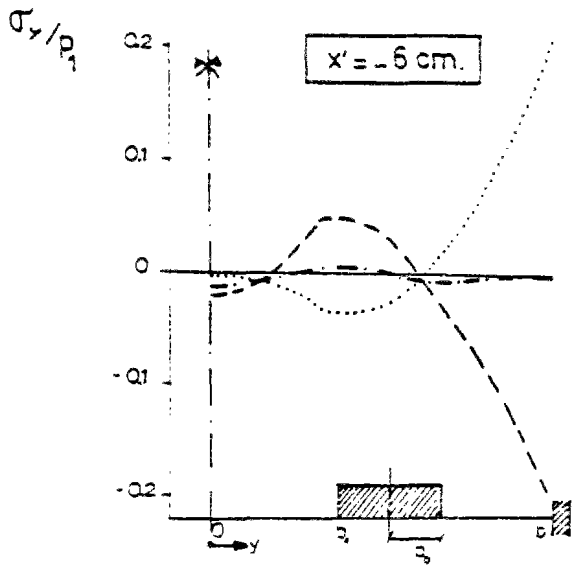


Fig. 5.29

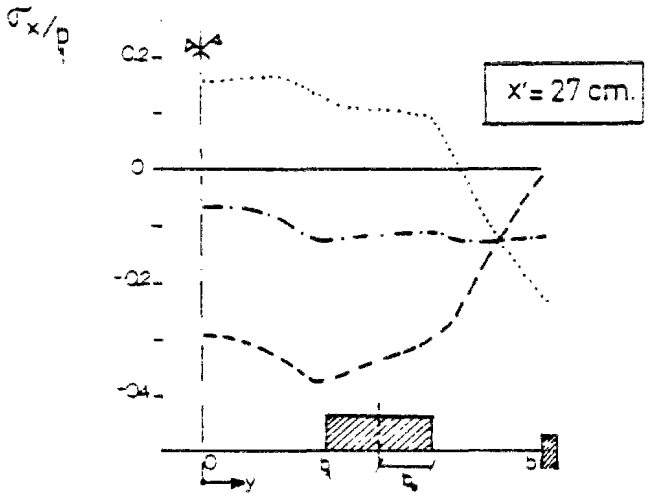


Fig. 5.27

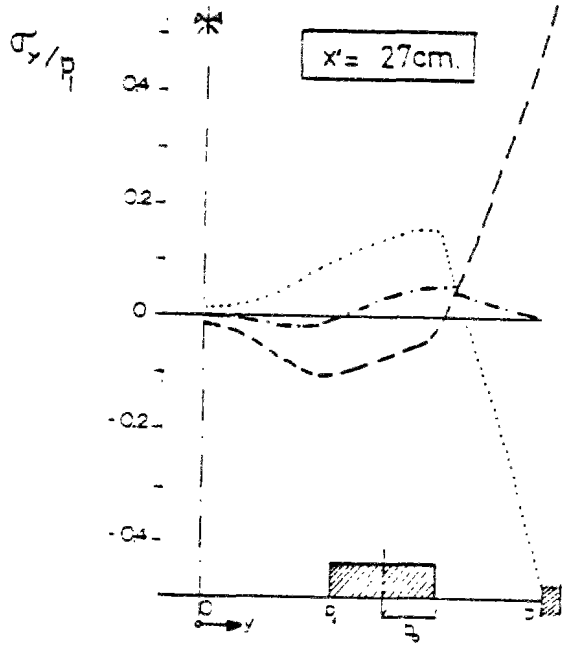


Fig. 5.30

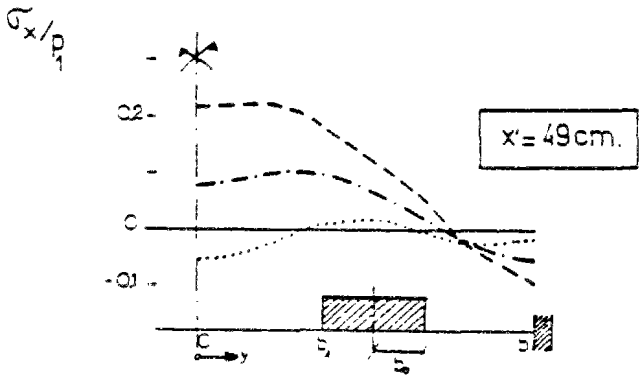


Fig. 5.28

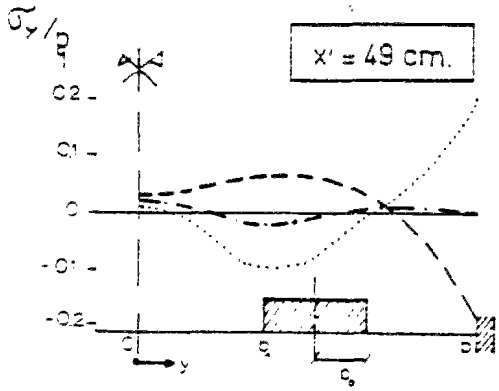


Fig. 5.31

Deux bossages - Courbes des contraintes transversales (σ_y)

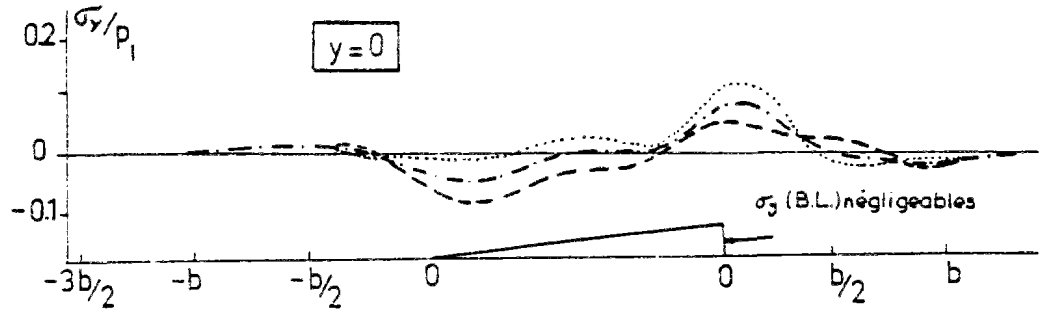


Fig. 5.32

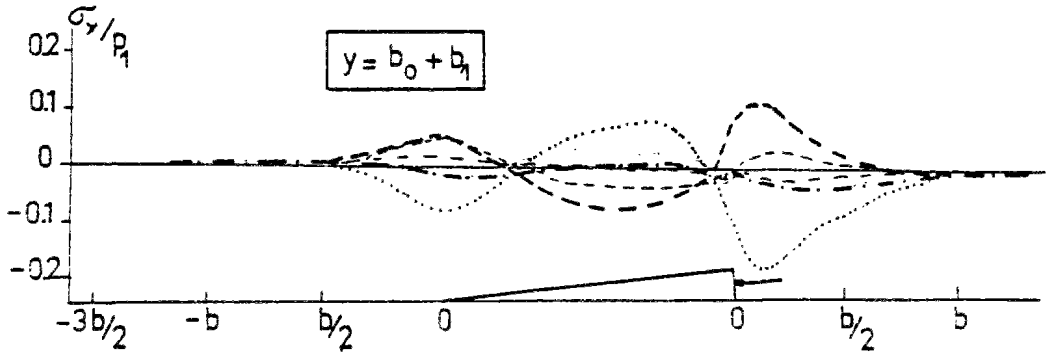


Fig. 5.33

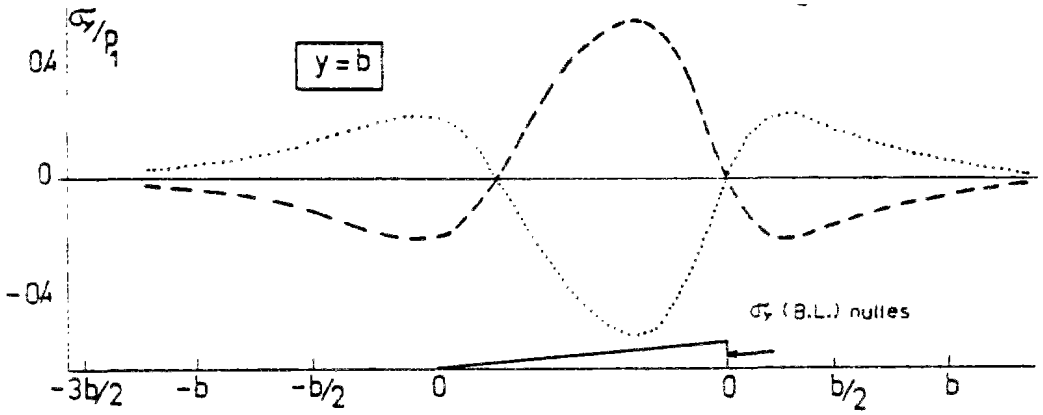


Fig. 5.34

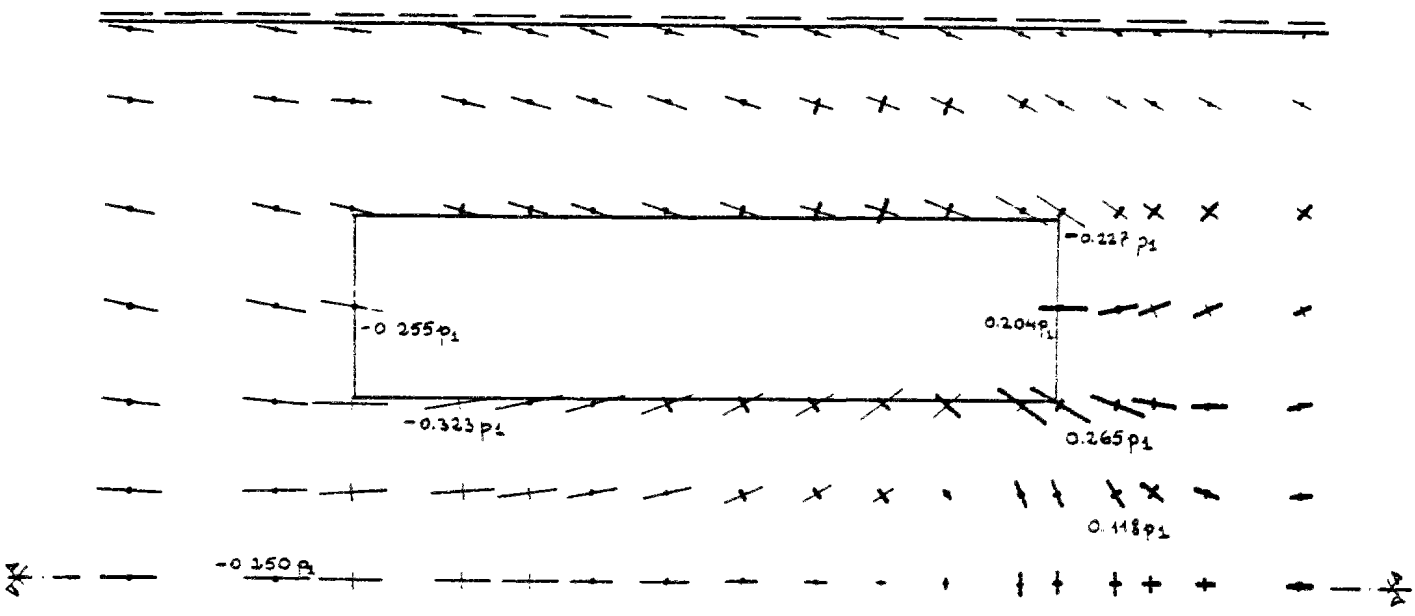


Fig. 5.35 - Fibre moyenne (diagramme des contraintes principales)

Deux bossages - Diagrammes des contraintes principales

Tractions

Compressions

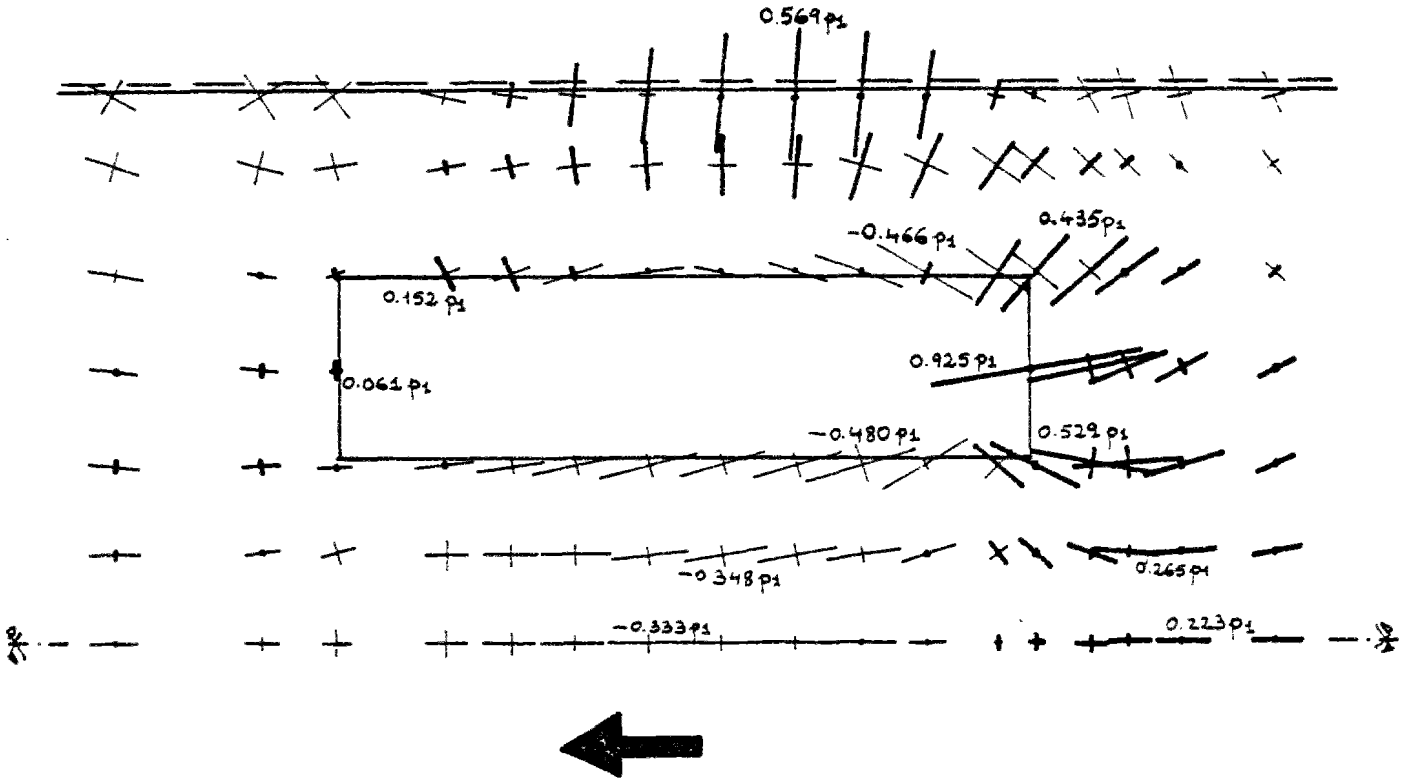


Fig. 5.36 - Fibre supérieure

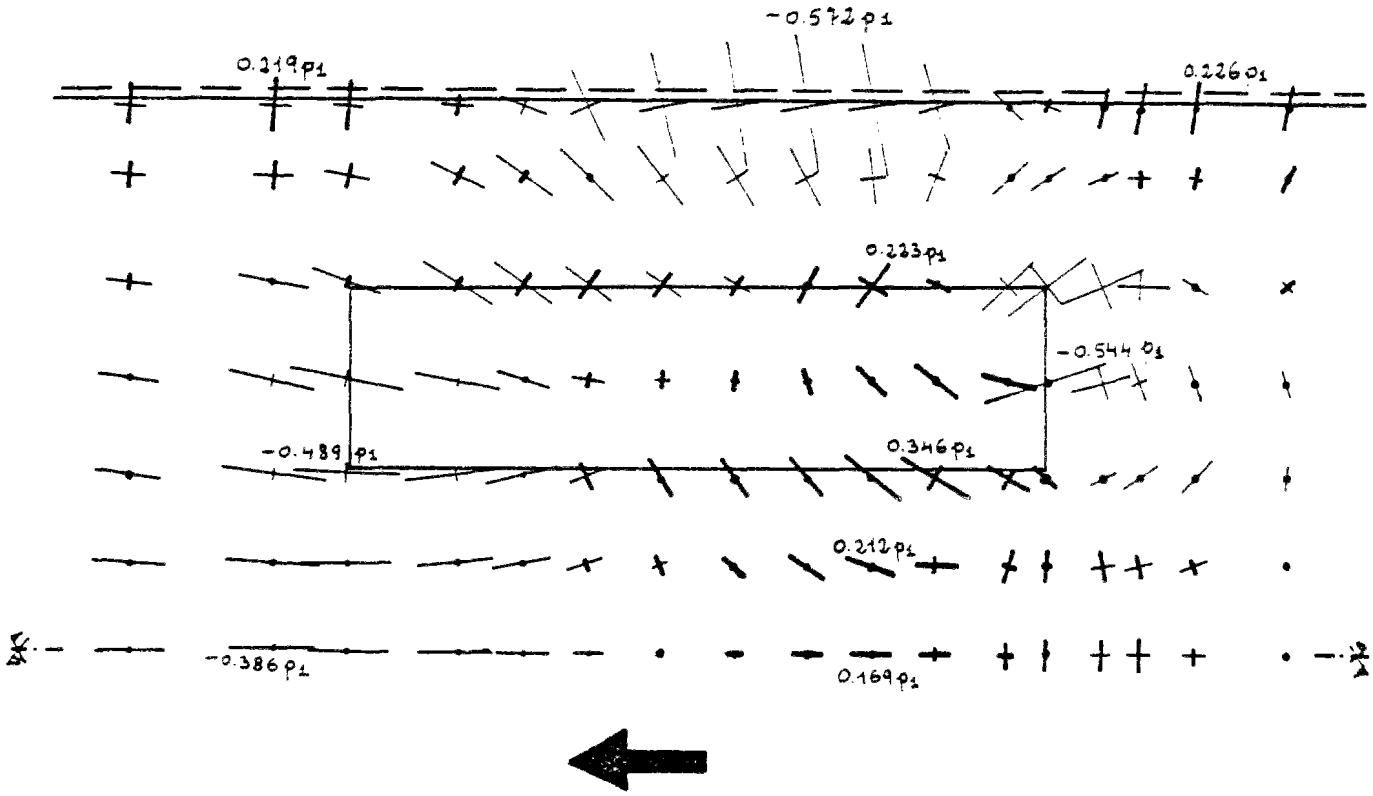


Fig. 5.37 - Fibre inférieure

δ = Compression maximale devant le bossage / traction maximale derrière le bossage = 1.24

Fp et pl correspondent à la précontrainte d'un seul bossage. Les valeurs présentées ont été obtenues à l'axe du bossage (y = bo + bl). Des valeurs plus grandes peuvent, dans certains cas, apparaître pour y = bo.

— Par comparaison avec les résultats d'un seul bossage (cas CP-1), nous constatons que les valeurs des tractions restent assez proches, donc nullement affectées par la présence du deuxième bossage. La faible réduction des valeurs des résultantes des tractions est due seulement à la diminution de la largeur de la section transversale correspondante à chaque bossage.

Par contre, les compressions augmentent nettement, ce qui explique la variation du coefficient δ, qui valait 0.77 au cas d'un seul bossage.

— Les diagrammes des contraintes principales montrent que les deux zones critiques : derrière l'ancrage avec la fibre supérie tendue, et au milieu du bossage avec des tractions sur la fibre inférieure (maximum à 0.25 Lb de l'ancrage), s'étendent sur toute la zone interbossages, laquelle reste fortement sollicitée. Par contre, la proximité des parois latérales provoque une brusque réduction des flexions longitudinales dans la zone comprise entre le bossage et les bords du hourdis.

Aux bords de la pièce, nous obtenons une très forte flexion transversale qui tend la fibre supérieure du hourdis à côté du bossage et la fibre inférieure devant et derrière lui. Bien que dans la réalité, où les rotations transversales φ_y ne sont pas complètement empêchées, les flexions doivent être plus modérées, il paraît évident qu'un risque de fissuration existe dans cette zone là, quand les bossages sont assez proches des bords de la pièce.

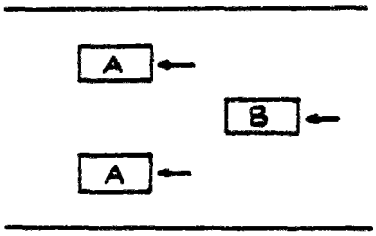
Le calcul donne aussi des tractions transversales dans la zone

interbossages qui est proche du point d'application de la charge.

5.1.5.2. - Trois bossages.-

— Nous avons calculé le cas CP-14, qui correspond à l'essai Ho-C. Les dimensions du hourdis, du bossage et des âmes sont les mêmes que pour les cas CP-1 et CP-12, déjà étudiés. Seul le nombre de bossages varie.

Les figures 5.38 à 5.42 présentent les courbes de contraintes σ_x et σ_y, suivant certaines sections longitudinales. Les diagrammes de contraintes principales sont indiquées dans les figures 5.43 et 5.45.



— Les principaux résultats obtenus pour les ancrages antérieurs (A) et postérieur (B), sont montrés ci-après. Fp et p_1 se rapportent toujours à la précontrainte d'un seul bossage.

	BOSSAGE A			BOSSAGE B		
	Derrière	Intérieur	Devant	Derrière	Intérieur	Devant
$\sigma_{x,moyenne}$ maximale	0.081 pl (traction)		-0.355 Pl (compression)	0.262 pl (traction)		-0.068 pl (compression)
σ_x (traction) maximale	0.704pl (fibre sup.)	0.109 pl (fibre inf.)		0.923 pl (fibre sup.)	0.329 pl (fibre inf.)	
Flexion($\sigma_{x,sup} - \sigma_{x,moy}$)	0.623 pl		0.198 pl	0.661 pl		0.316 pl
Résultante Tx,m des tractions moyennes	0.208Fp			0.300 Fp		
Résultante Tx,f des flexions	0.137 Fp (fibre sup.)	0.039 Fp (fibre inf.)		0.193 Fp (fibre sup.)	0.194 Fp (fibre inf.)	

Trois bossages - Courbes des contraintes longitudinales

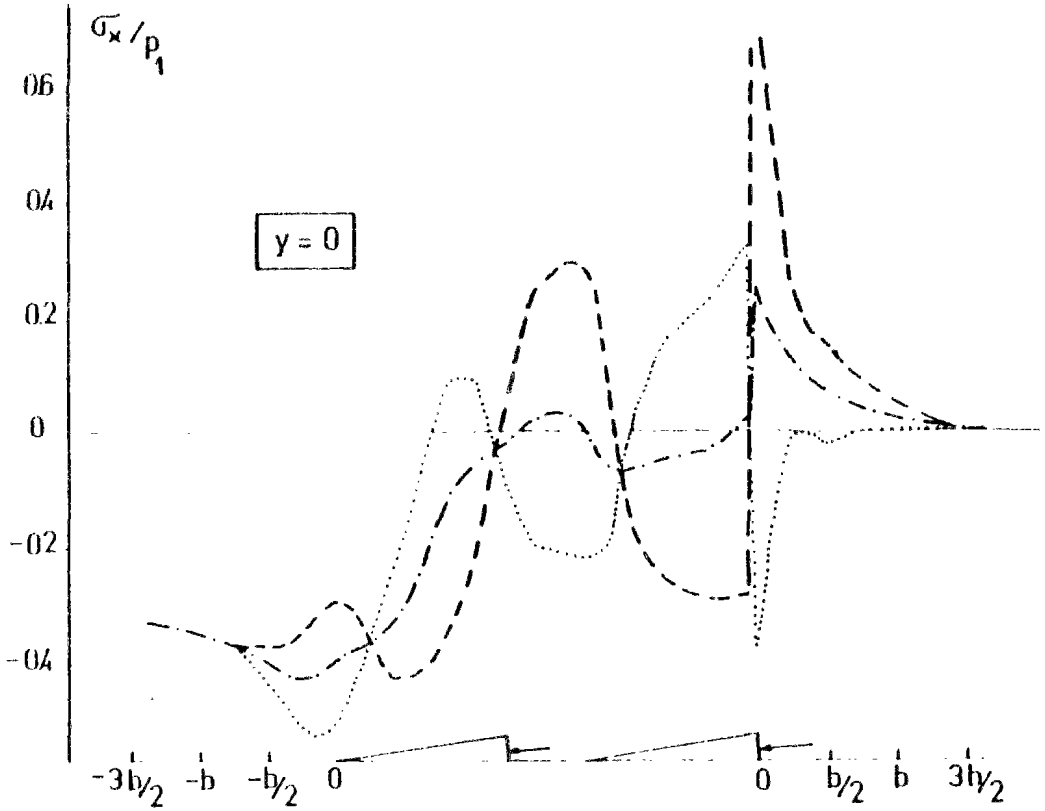


Fig. 5.38

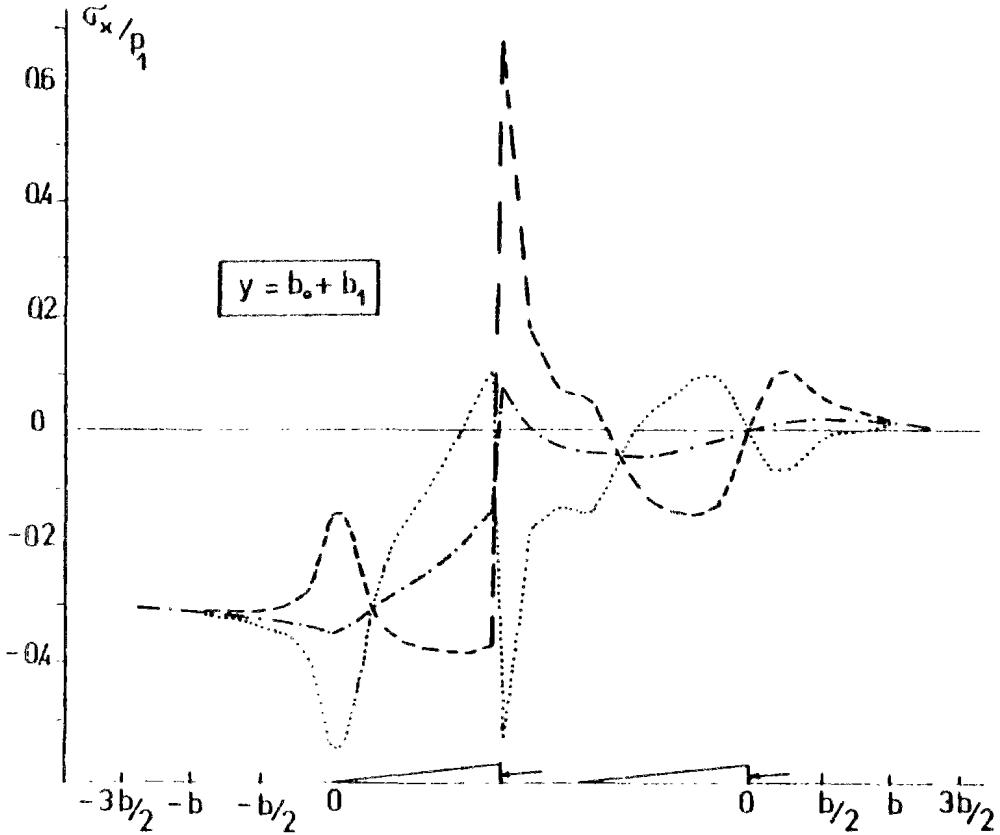
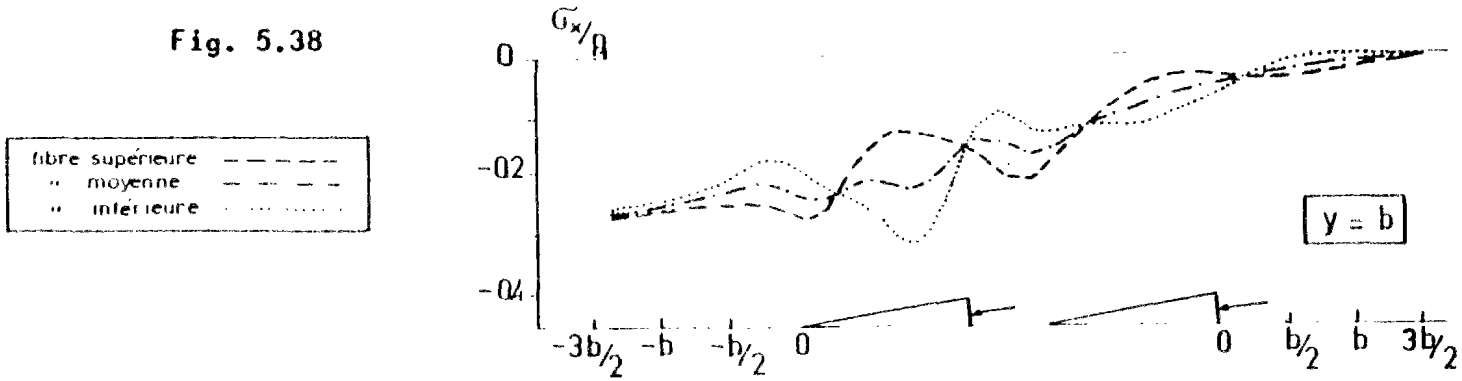


Fig. 5.39



Trois bossages - Courbes de contraintes transversales

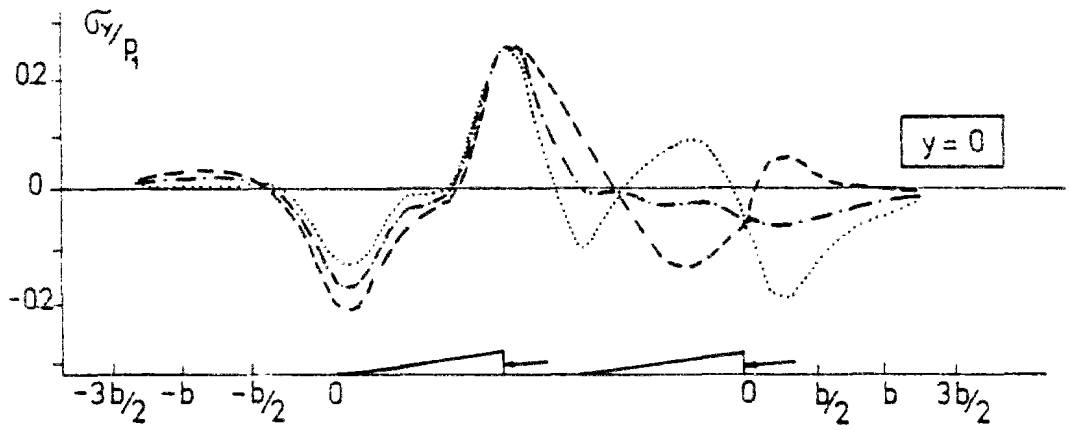


Fig. 5.41

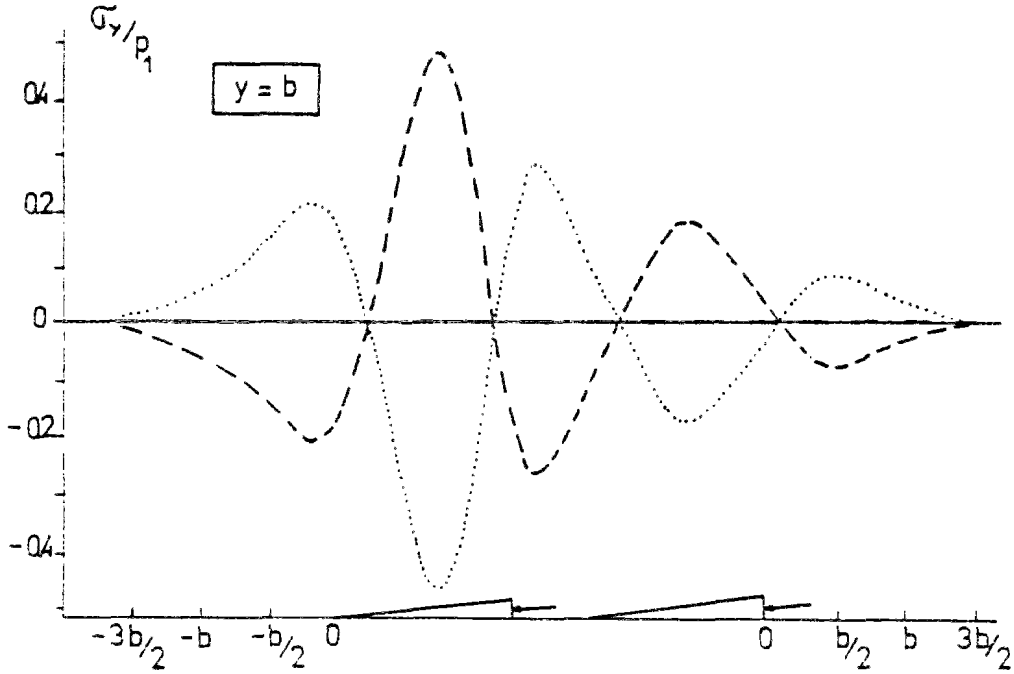
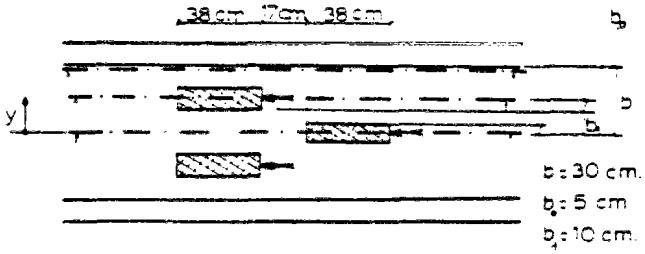


Fig. 5.42



Trois bossages - Diagrammes des contraintes principales

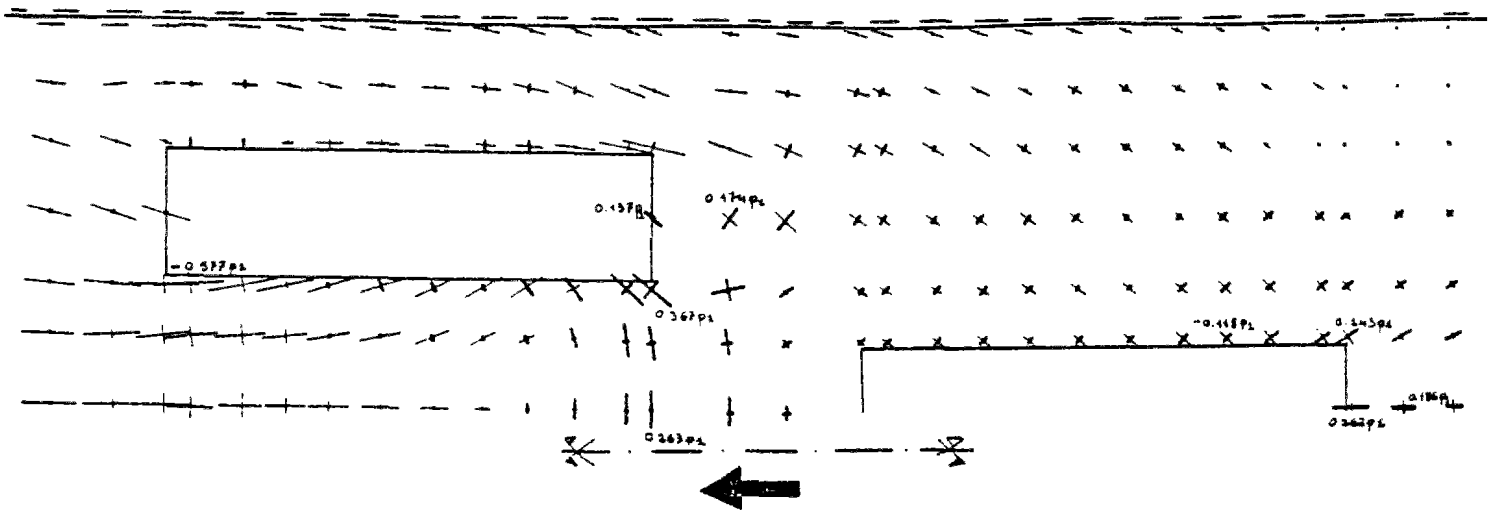


Fig. 5.43 - Fibre moyenne

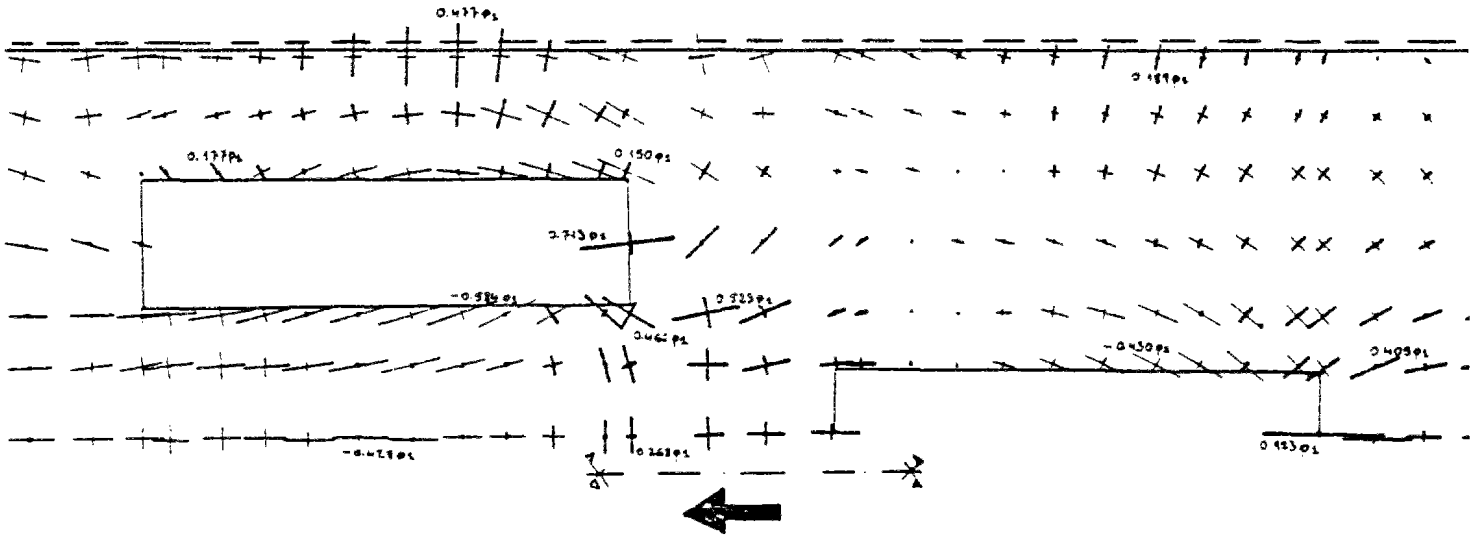


Fig. 5.44 Fibre supérieure

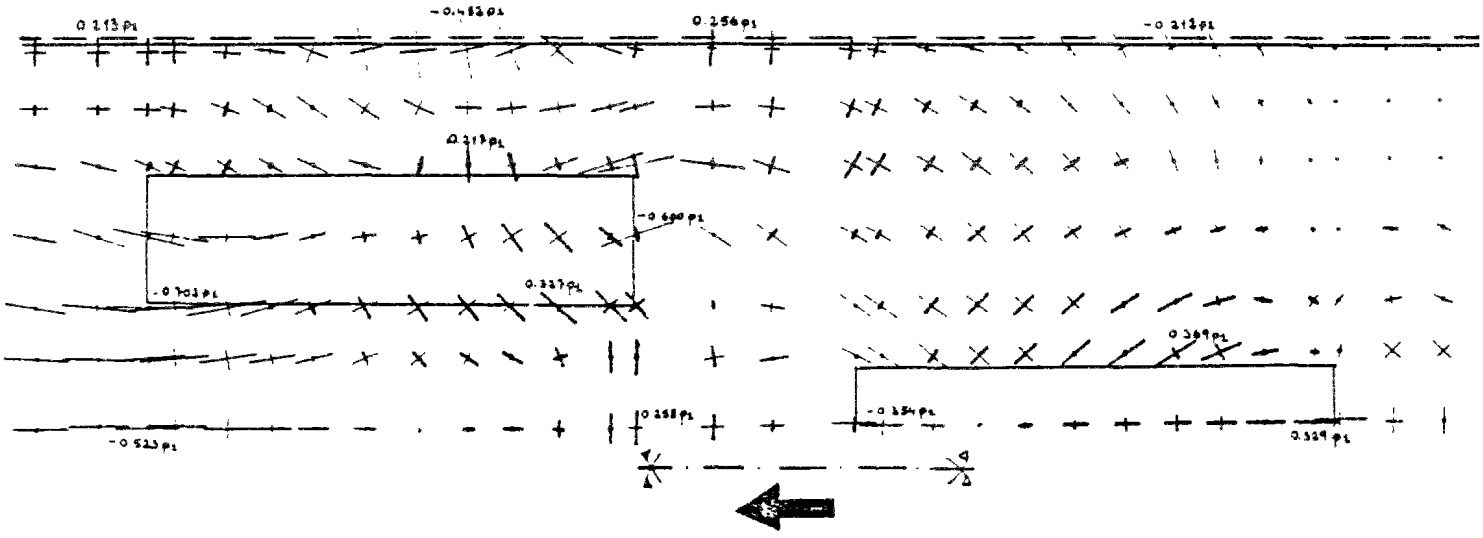


Fig. 5.45
Fibre inférieure

——— Tractions
——— Compressions

— La comparaison de ces résultats avec les cas CP-1 (1 bossage) et CP-12 (2 bossages) permet de tirer les remarques suivantes :

a) Les allures des courbes de contraintes sont celles qu'on pouvait prévoir à partir des résultats des cas CP-1 et CP-12. Les différentes flexions longitudinales et transversales persistent, et leurs grandeurs ne varient pas tellement. La flexion longitudinale en arrière des ancrages A et celle en avant du B, se confondent en une seule.

b) La présence de l'ancrage B annihile en partie les tractions d'entraînement des ancrages A. Par contre, une légère augmentation de la traction d'entraînement de l'ancrage B a été obtenue.

c) Le calcul n'a pas vérifié le principe de la superposition des cas CP-1 et CP-12. Cela est particulièrement évident dans la zone située entre les trois bossages. En effet, à cause de la présence des ancrages A, la diffusion de la précontrainte B n'est plus réalisé de la même manière qu'en CP-1 (voir figures 5.43 et 5.19) : les compressions de l'ancrage B se sont dirigées directement vers les bossages A, dont la rigidité est nettement plus grande que celle du hourdis. Cela a décomprimé la zone située en avant du bossage B, laquelle apparait ainsi soumise à un état de tractions transversales σ_y, à peu près uniforme sur l'épaisseur de la dalle, qui prend des valeurs importantes sur l'axe de la pièce. Néanmoins, les résultats des essais, comme l'on verra plus loin, semblent indiquer que la réalité serait moins critique. L'explication provient de ce que le calcul par la méthode des coupures, on le rappelle, a supposé la planeité des sections, hypothèse qui simule mal le comportement réel de cette zone à relief rapidement variable. A cela s'ajoute la mauvaise convergence des séries de Fourier dans les zones de forte discontinuité.

5.2. - <u>Résultats obtenus par la méthode des éléments finis</u>.- L'application de la méthode des éléments finis a été menée, on le rappelle, en deux phases :

A) En une première, nous nous sommes limités au problème bidimensionnel de la diffusion de la précontrainte dans le plan moyen du hourdis, lequel se considère encastré élastiquement dans les âmes latérales (cf.3.3.5). La précontrainte, au lieu d'être appliqué brutalement comme dans le cas d'un ancrage interne, est supposée répartie uniformément sur la surface de jonction hourdis-bossage (voir fig.3.2).
Cette phase visait en particulier les points suivants :
a) Vérifier la bonne convergence du modèle d'éléments finis proposé , dont une grande partie allait être utilisée dans le calcul tridimensionnel.
b) Evaluer l'importance et la nature des phénomènes de non-linéarité qui surgissent par suite de la diffusion de la précontrainte uniquement.
c) Etudier l'effet d'une compression générale dans le hourdis, qui s'ajoute au phénomène local de diffusion de la précontrainte.
d) Obtenir la raideur, vis-à-vis des déplacements longitudinaux, fournie par les parois latérales. Cela en vue d'obtenir les coefficients des appuis élastiques qui se substituent aux parois lors de l'étude tridimensionnelle. La réduction du nombre d'éléments que cela permet a été indispensable à cause de la petite capacité de l'ordinateur utilisé.
B) Dans la deuxième phase, nous avons étudié l'influence des flexions locales, dont l'importance à proximité du bossage a été déjà décelée avec le calcul élastique par la méthode des coupures.

5.2.1. - Etude bidimensionnelle.-

— Nous présentons les résultats obtenus dans le calcul des corps d'épreuve des essais Ho-A (1 bossage) et Ho-B (2 bossages), dont les dimensions ont été définies dans les fig. 4-1 à 4-3.
Nous avons utilisé une maille comportant 250 noeuds et 600 éléments, dont 400 pour le béton, 185 pour l'acier et 15 pour la liaison hourdis-parois latérales.

Nous sommes arrivés jusqu'à une valeur de la précontrainte de 300 KN, bien supérieure à la charge de service, qui peut être évaluée en 100 KN environ, et à la charge ultime atteinte aux essais (170 KN, avec rupture du câble de la précontrainte).
Les résultats les plus représentatifs sont montrés aux figures 5.46 à 5.49 :

a) Contraintes maximales de traction pour le béton et l'acier juste derrière le bossage (fig. 5.46).

b) Résultante des tractions d'entraînement sur la section transversale en arrière du bossage (fig 5.47).

c) Compressions maximales devant le bossage (fig. 5.48).

d) Evolution de la fissuration au fur et à mesure du chargement (fig 5.49).

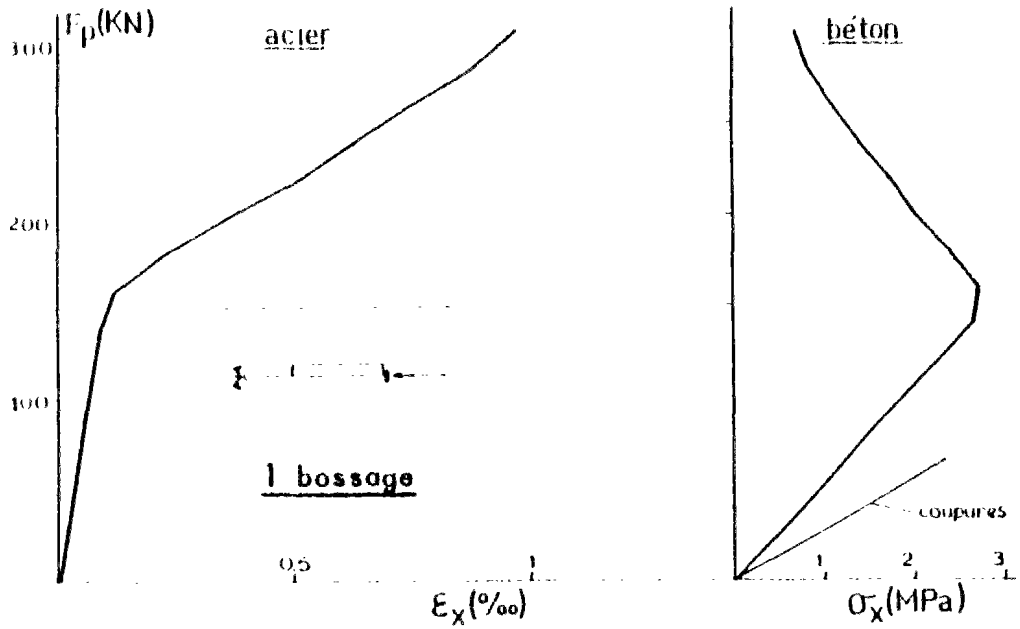
Nous y avons aussi signalé les valeurs obtenues avec la méthode des coupures (en traits fins).

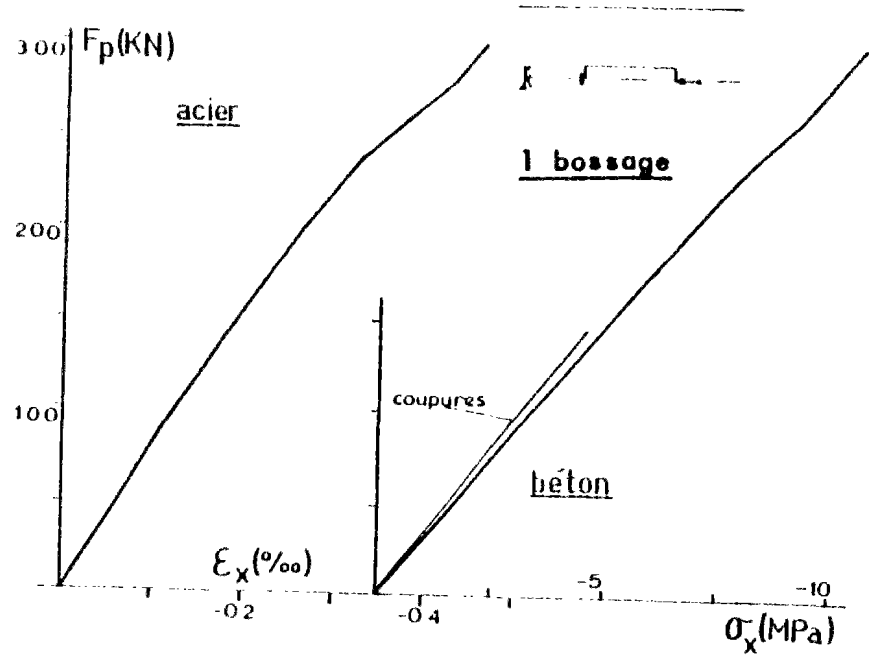
— De l'examen de ces courbes, nous pouvons tirer les remarques suivantes :

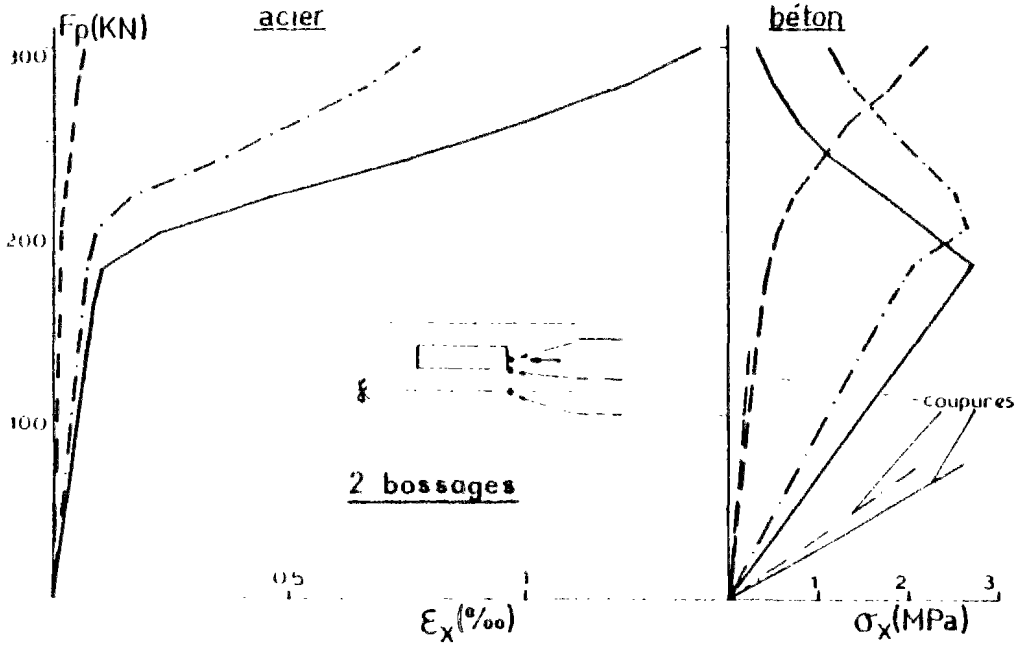
1. - Sous la charge de service l'état de contraintes sur la fibre moyenne du hourdis reste nettement en phase linéaire. Les premières fissurations, aussi bien pour un que pour deux bossages, s'amorcent vers 160 KN (une fois et demie la charge de service). Au delà, on remarque la prise progressive de la charge par l'acier aux dépens du béton, sans s'approcher pour autant du niveau de plastification (pour une précontrainte de 300 KN, les plus grandes tractions dans l'acier sont de 200 MPa (1 bossage) et 280 MPa (2 bossages) environ).

2. - Il n'existe pas de fortes cencentrations de compressions. Celles-ci restent très modérées, même sous des charges importantes. La petite non-linéarité qui apparait dans la fig.5.48, est seulement due à la fissuration dans la zone d'entraînement.

3. - En ce qui concerne les compressions, les valeurs élastiques obtenues concordent assez bien avec celles de la méthode des coupures, ce qui confirme que le bossage a pour effet de distribuer linéairement les charges dans la plaque.







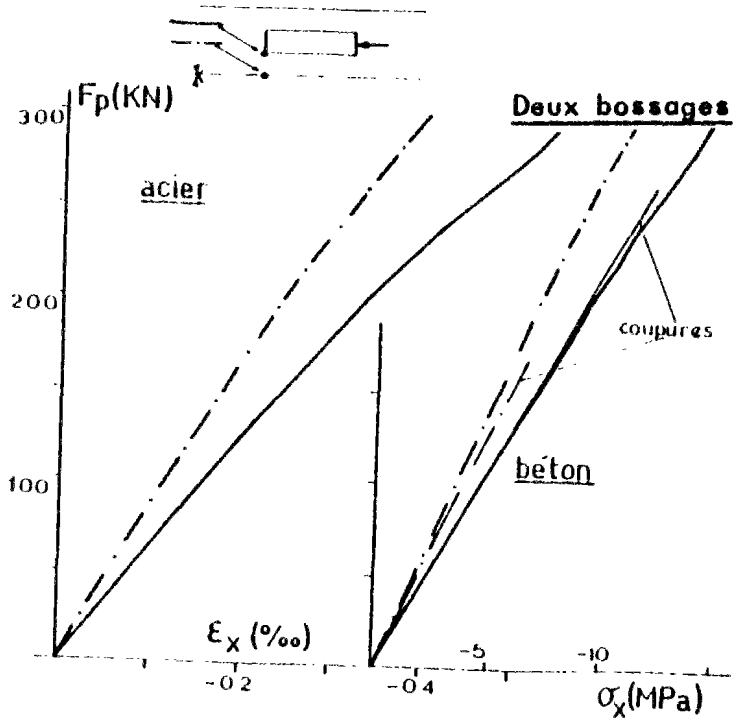
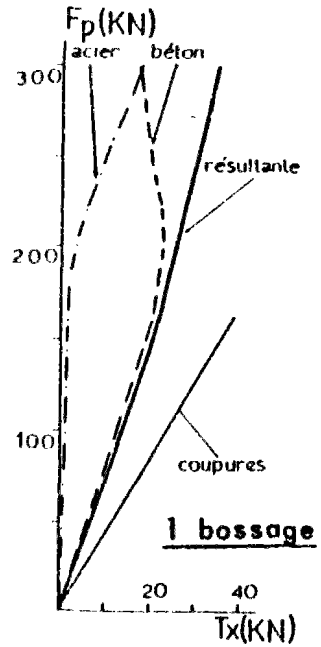


Fig. 5.46 - Tractions d'entraînement derrière le bossage

Fig. 5.49 - Comparaison

Fig. 5.47 - Résultantes des tractions d'entraînement derrière le bossage



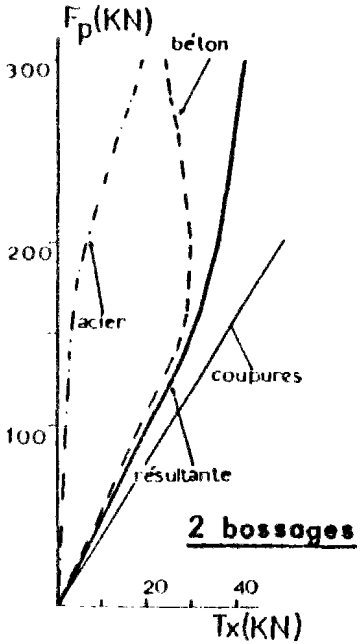
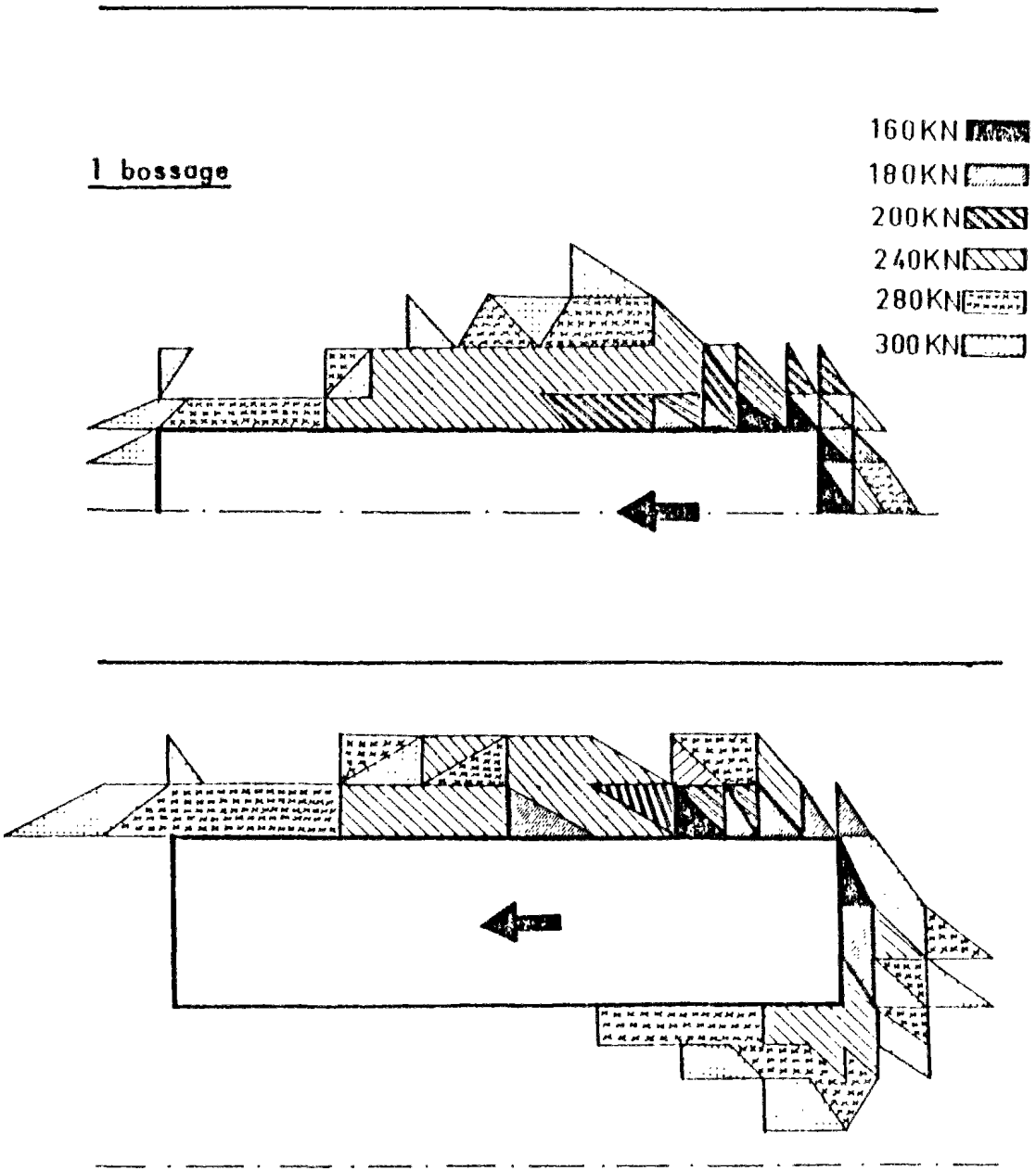


Fig. 5.49 - Progression de la fissuration



Par contre, les valeurs des tractions d'entraînement, ainsi que leur résultante, sont nettement plus faibles. Cela vient du fait qu'en éléments finis, nous n'avons pas considéré la forte discontinuité géométrique qui existe à l'aplomb de l'ancrage. Etant donné que le centre de gravité des sections du bossage ne coïncide pas avec la fibre moyenne du hourdis, il existe un "couplage" entre les efforts plans et de flexion (cf.3.12), qui est particulièrement fort dans le voisinage de l'ancrage. Les fortes flexions qui y existent entraînent donc des tractions au niveau du plan moyen du hourdis, dont nous ne pouvons pas tenir compte dans le calcul bidimensionnel.

4. - L'examen du développement de la fissuration dans le cas de deux bossages relativement proches (fig.5.49), montre que celle-ci s'étale sur les bords extérieurs des deux bossages, et derrière eux, alors que la zone inter-bossages n'y est pas affectée. Ceci se traduit dans une évolution plus rapide des fissures et dans une sollicitation plus forte des aciers d'entraînement (fig.5.46) par rapport au cas d'un seul bossage.

5. - Les calculs avec un et deux bossages ont été répétés en supposant que, avant l'application de la précontrainte, existe dans le hourdis un état de précompression générale, que nous avons fixé à 3 et à 6 MPa.

Les résultats obtenus, que nous ne présentons pas, montrent que la précompression générale n'apporte aucune influence, si ce n'est qu'elle permet de retarder l'apparition des fissures, en réduisant entre autres la traction d'entraînement. Les compressions devant le bossage restent modérées et n'entrent pas nettement dans la phase à comportement non-linéaire.

L'effet d'une compression générale dans la zone d'ancrage s'avère donc être favorable dans tous les cas.

— Nous pouvons donc conclure que la diffusion de la précontrainte seule n'est pas capable de solliciter la hourdis à un

niveau suffisamment élevé. Le bossage répartit l'application de la force sur le hourdis, qui se fait graduellement, et l'état de contraintes au niveau de la fibre moyenne de la dalle reste dans le domaine linéaire sous les charges de service.
La prise en compte des flexions locales est donc indispensable. Celles-ci, très fortes au voisinage de l'ancrage, doivent certainement produire des contraintes hors du domaine linéaire, ainsi que de fortes fissurations.

5.2.2. - Etude tridimensionnelle.-

— Nous avons étudié avec le programme FLF le corps d'épreuve utilisé aux essais de 1974 (cf.4.1), dont les dimensions son explicitées dans la figure 5.50.
Les corps d'épreuve à échelle réduite des essais Ho-A, Ho-B et Ho-C ne se prêtaient pas à cette analyse parce que, à cause de la précompression générale appliquée, on n'y avait pas relevé de phénomènes de non-linéarité.

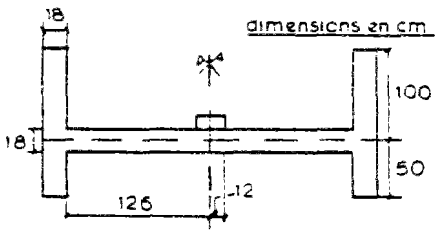


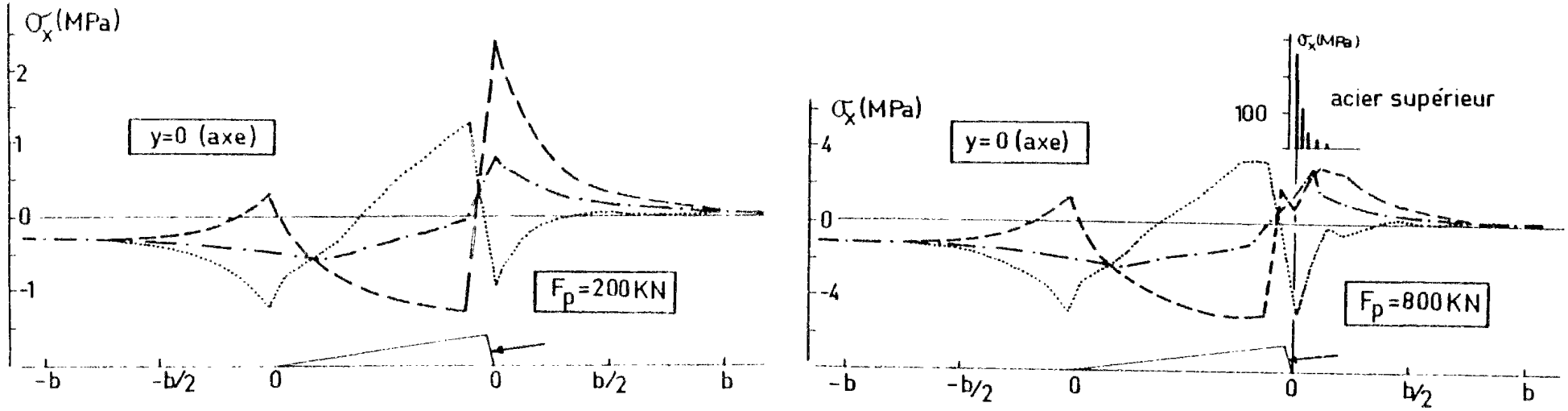
FIG 5 50

— Nous avons utilisé une maille comportant 335 éléments et 200 noeuds. Sur la ligne de jonction hourdis-parois, 15 appuis élastiques ont simulé l'encastrement élastique, vis-à-vis des déplacements longitudinaux, fourni par les parois latérales. La section du hourdis a été divisée en 5 couches de béton et 2 couches d'acier (supérieur et inférieur).
La précontrainte a été appliquée par étapes de 200 KN jusqu'à la première fissuration, au delà de quoi on a continué de 100 en 100 KN. Le calcul s'est arrêté à 1500 KN, par rupture du béton du bossage juste devant l'ancrage. La charge de service pouvait être évaluée en 800 KN environ.
On rappelle que le calcul suppose un béton avec les caractéristiques suivantes :

$$f'_c\,(N/mm^2) = 30 \quad ; \quad \nu = 0.2 \quad ; \quad E'_c\,(KN/mm^2) = 30\,,$$

qui correspondent aux essais de KUPFER.

Fig. 5.51 - Contraintes longitudinales suivant l'axe de la pièce



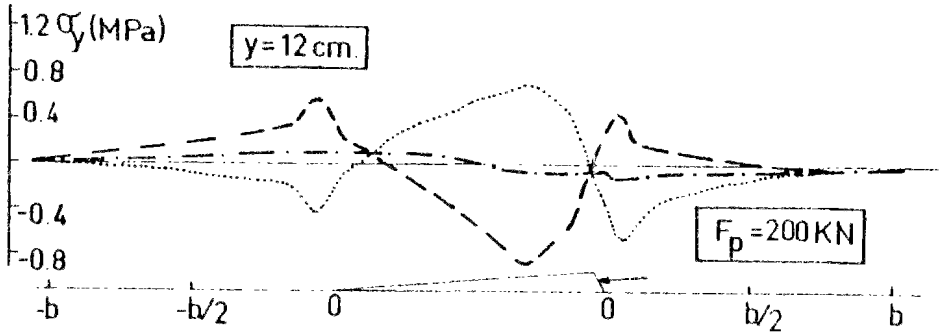
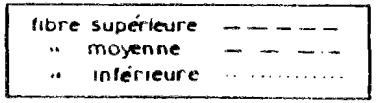
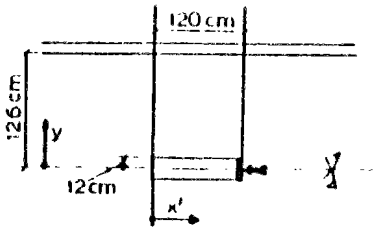


Fig. 5.52 - Contraintes transversales suivant l'axe de la pièce





Courbes de contraintes longitudinales suivant quelques sections transversales

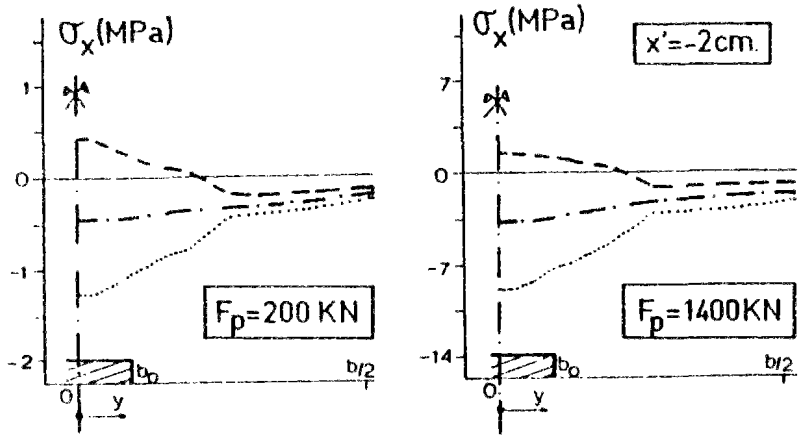


Fig. 5.53

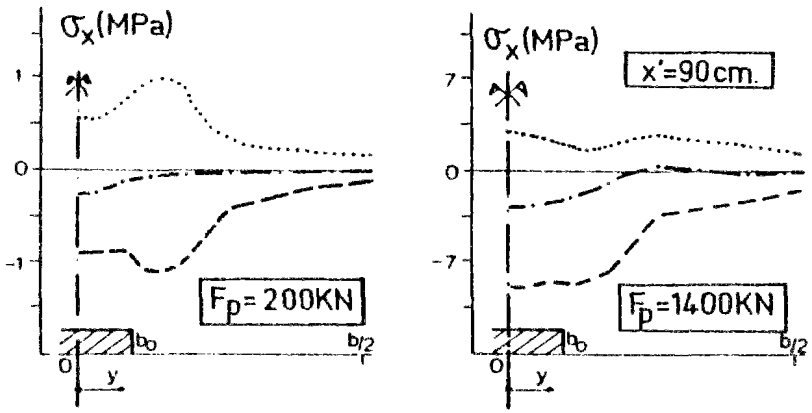


Fig. 5.54

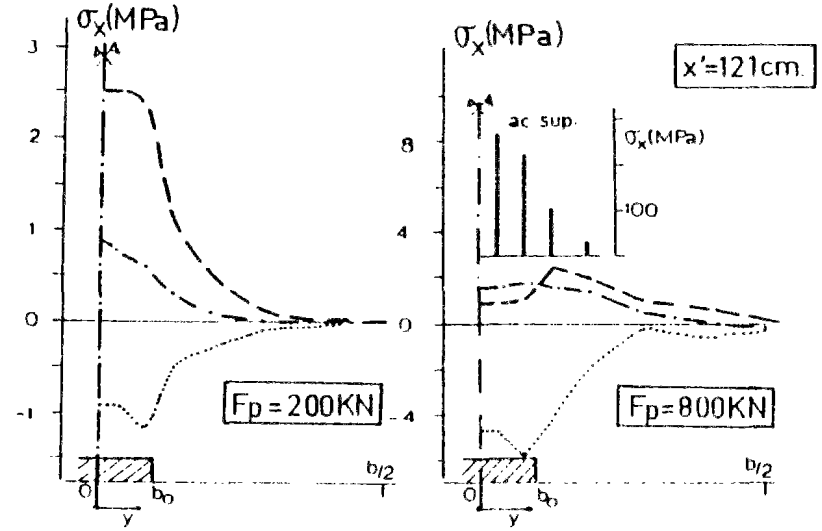


Fig. 5.55

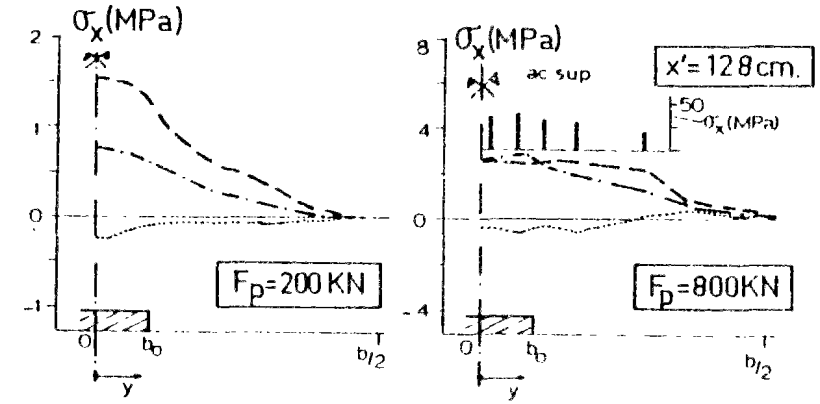


Fig. 5.56

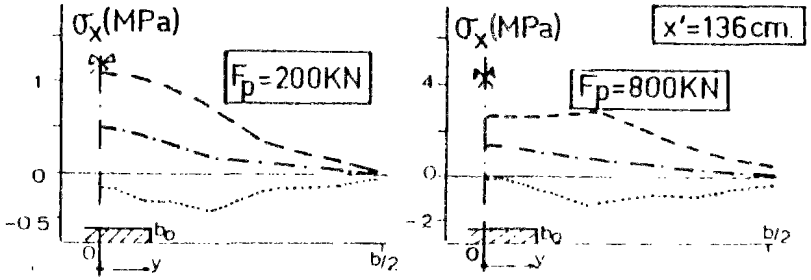


Fig. 5.57

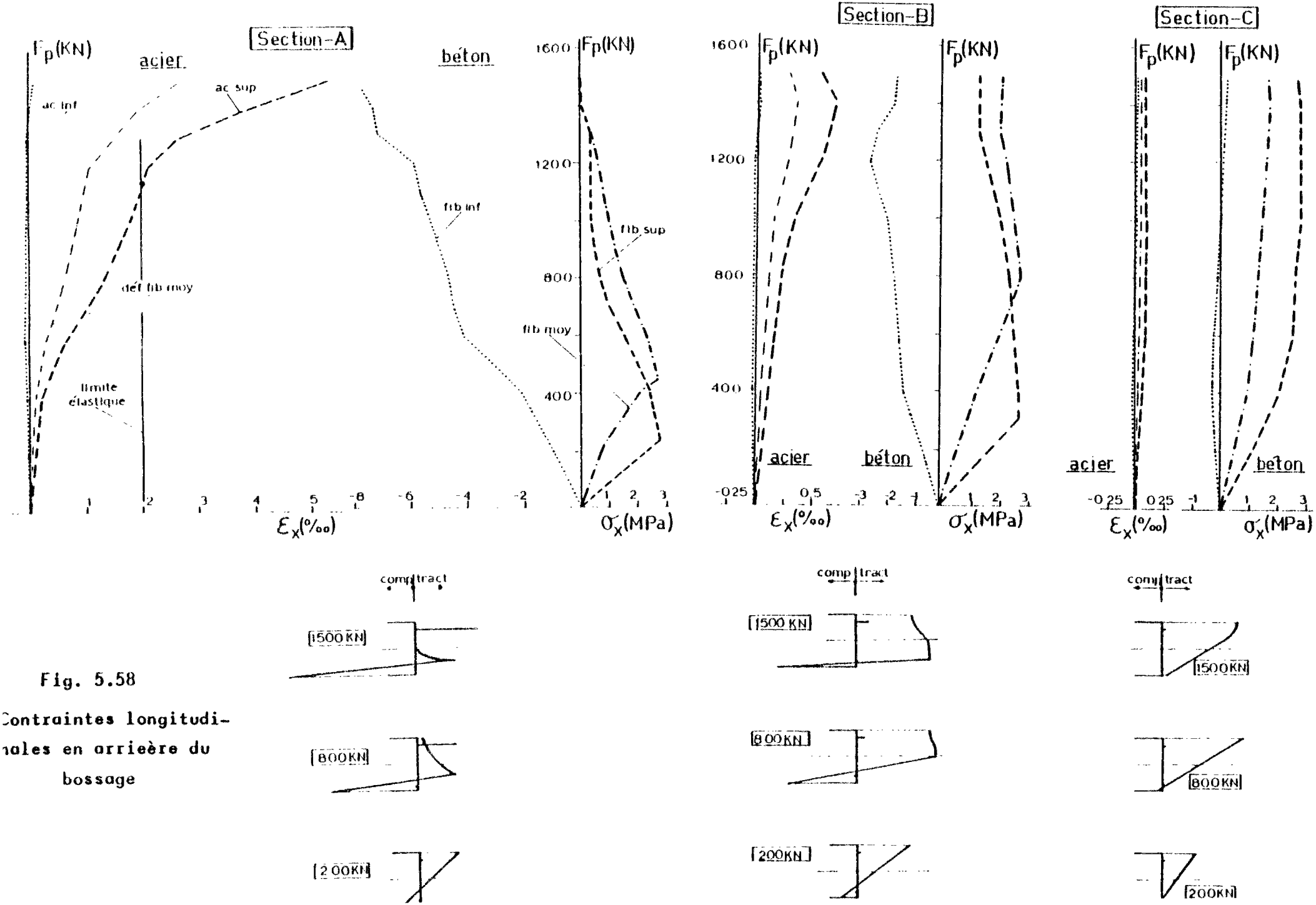
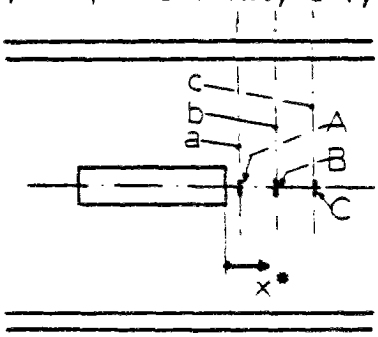


Fig. 5.58

Contraintes longitudinales en arrière du bossage

— Les figures 5.51 à 5.57 présentent les valeurs des contraintes σ_x et σ_y, suivant quelques sections longitudinales et transversales, sous différents états de chargement.
Les allures pour une précontrainte de 200 KN ne diffèrent à peine de celles obtenues avec la méthode des coupures. Seule pointe de flexion derrière le bossage, quoi qu'encore marquée, s'est nettement adoucie.
Les courbes obtenues pour des précontraintes de 800 KN et de 1400 KN, montrent les fortes redistributions de contraintes qui se prosuisent aux alentours des zones fissurées.
— La fig. 5.58 montre l'état de déformations et des contraintes sur trois sections (A, B et C), situées dans l'axe de la pièce et, respectivement, à 1, 8 et 16 cm en arrière du bossage.



A la traction d'entraînement s'ajoute une forte flexion qui tend la fibre supérieure au hourdis. Cela est particulièrement importante dans la section A, située juste derrière la discontuinité du bossage : la fissuration de la fibre supérieure arrive très tôt et s'étend vite sur l'épaisseur de la section. A 1200 KN les aciers supérieurs se plastifient et la section devienne une vraie rotule avec l'armature supérieure en traction et une petite zone en bas, où le béton est en compression.
Dans la section 'B', la fissuration se produit aussi tôt mais, du fait de la rotule qui se développe rapidement en 'A', elle reste limitée, sans entraîner de fortes déformations dans les aciers.
A 16 cm derrière l'ancrage (section 'C'), du fait du développement de la fissuration dans la zone de devant, les sollicitations à partir d'un certain moment restent bloquées, sans que les augmentations successives de la précontrainte ne s'y fassent sentir.
— Dans la fig. 5.59, nous indiquons les valeurs des résul-

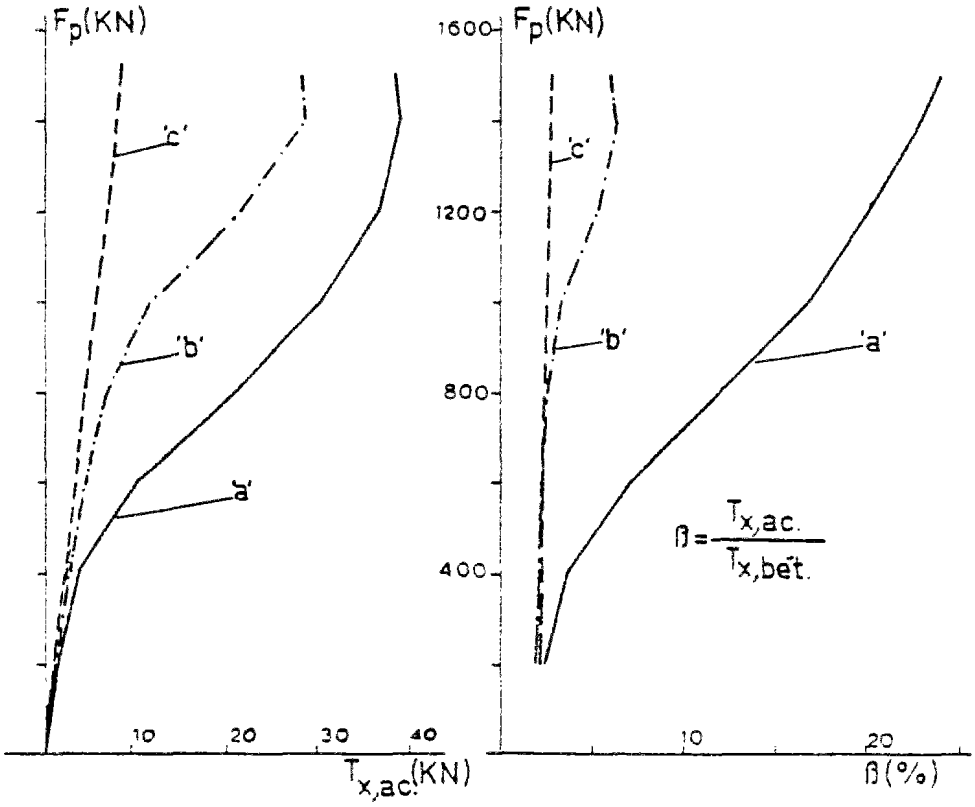


Fig. 5.59 - Résultante de tractions d'entraînement dans les aciers

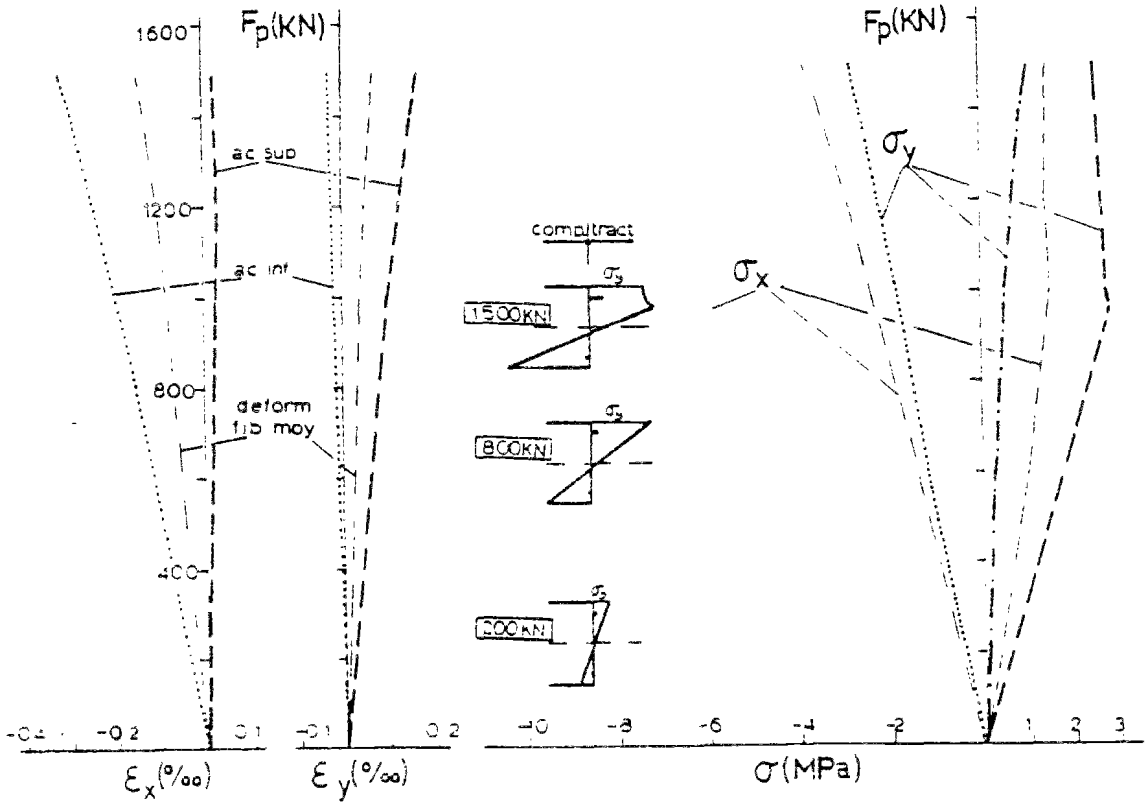


Fig. 5.60 - Contraintes longitudinales et transversales devant le bossage

tantes des tractions longitudinales σ_x, reprises par les aciers, le long des trois sections transversales 'a', 'b' et 'c', ainsi que leur rapport avec celles résistées par le béton. Les allures des courbes σ_x pour ces sections ont été déjà montrées dans la figures 5.53 à 5.55.

Ces figures confirment ce que l'on vient de dire : la non linéarité due à la fissuration dans la zone d'entraînement reste très concentrée juste derrière la fin du bossage.

— Dans la fig. 5.60, nous rapportons les valeurs des contraintes longitudinales σ_x et transversales σ_y, juste devant le bossage, qui est la zone où se trouvent les plus fortes compressions.

Au niveau de la fibre moyenne, nous trouvons des contraintes σ_x de compression et σ_y de traction (d'éclatement) assez modérées (voir fig 5.51 et 5.52). Une flexion, due à la poussée au vide du câble, augmente les tractions transversales dans la fibre supérieure du hourdis, qui devient fissurée pour une charge de 1000 KN. Cette fissure n'arrive pourtant pas à entraîner des fortes tractions dans les aciers.

Quant aux contraintes longitudinales σ_x , les valeurs obtenues confirment que l'application graduelle de la précontrainte à travers le bossage, empêche l'apparition de fortes compressions. Celles-ci n'atteignent jamais dans le hourdis des valeurs importantes, même sous de charges plus grandes que celle de service.

— Les fig. 5.61 à 5.63 montrent, respectivement, le développement de la fissuration au niveau de la fibre moyenne, supérieure et inférieure de la plaque, au fur et à mesure de l'augmentation de la précontrainte. Dans la fig. 5.64, sont montrés les états de sollicitation des aciers un peu avant de la rupture (Fp = 1400 KN).

Nous pouvons tirer les remarques suivantes :

Progression de la fissuration

figures-a

400KN

600KN

800KN

f. moyenne

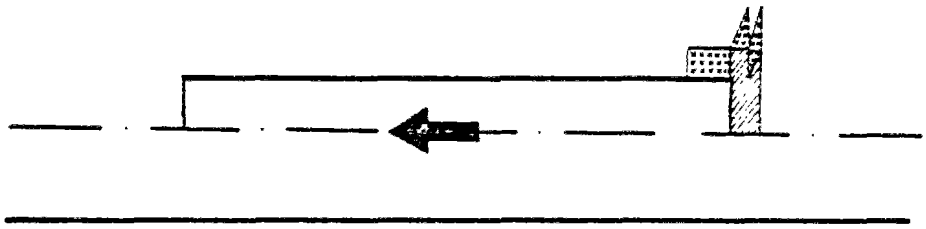


Fig. 5.61-a

f. Supérieure

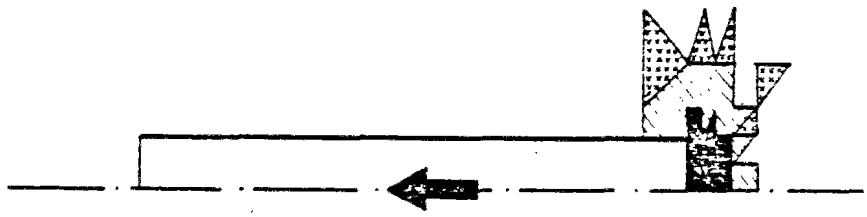


Fig. 5.62-a

f. inférieure

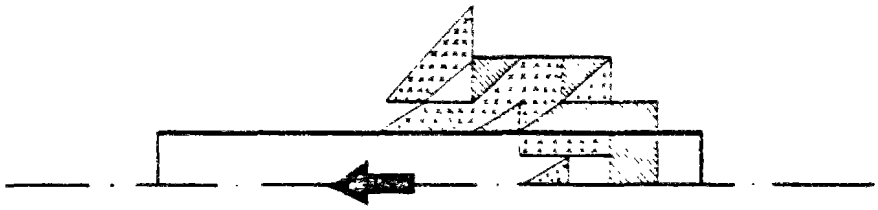


Fig. 5.63-a

Progression de la fissuration (cont.)

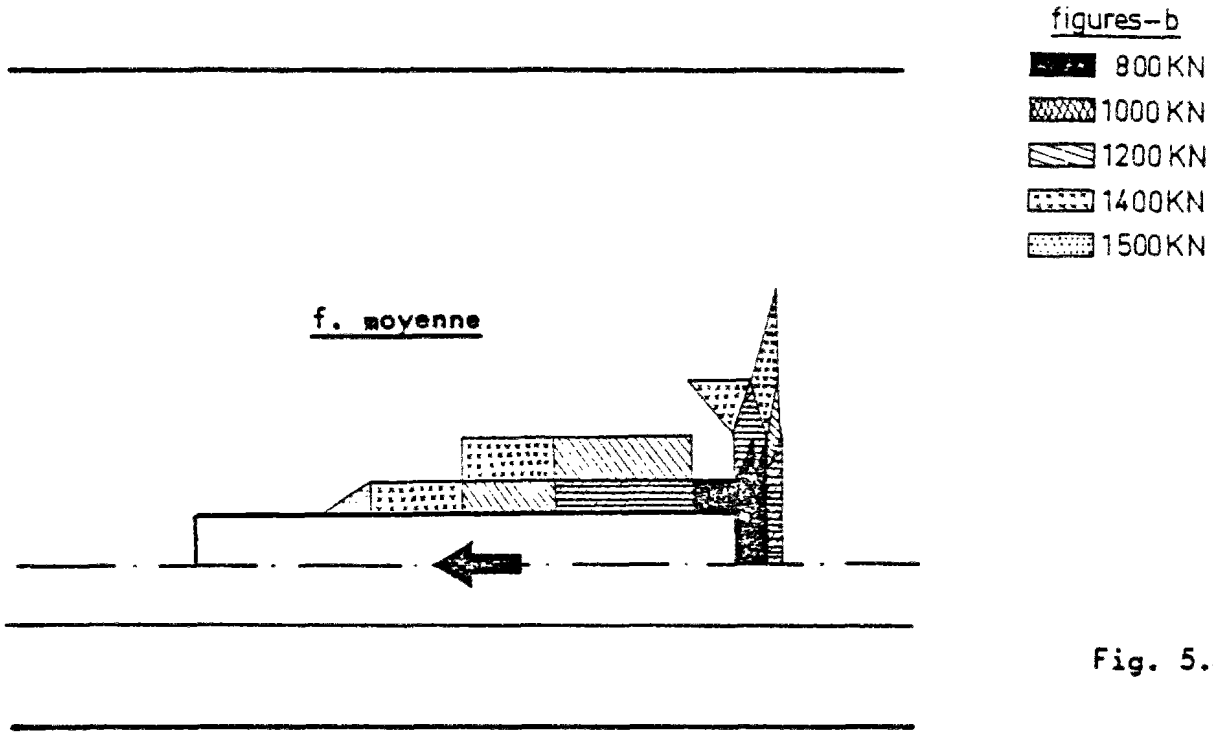


Fig. 5.61-b

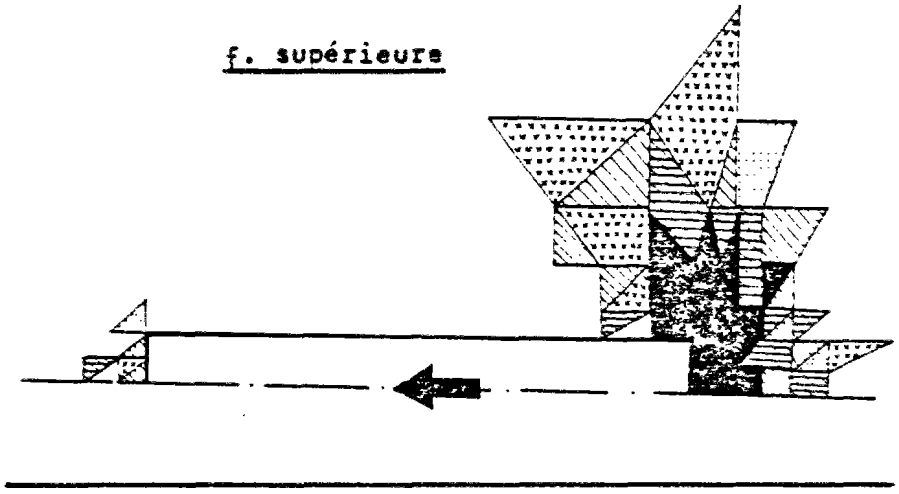


Fig. 5.62-b

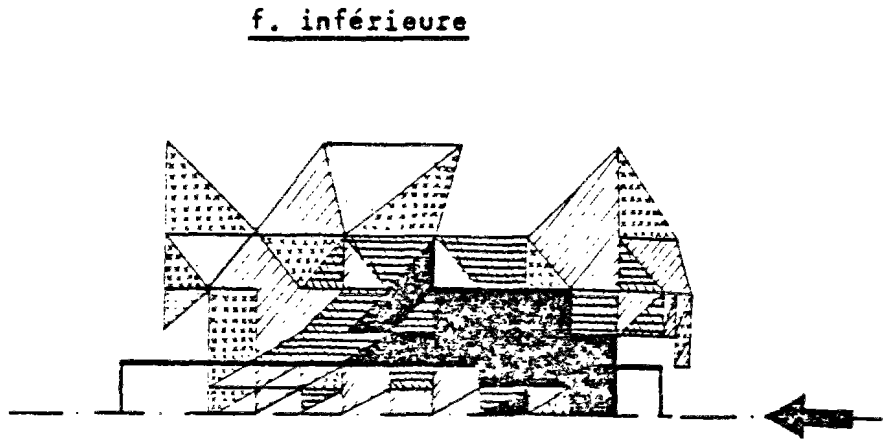


Fig. 5.63-b

a) Une première fissuration apparaît très tôt ($F \simeq 400$ KN). Elle se produit, sur le fibre supérieure du hourdis, dans la zone située juste en arrière du bossage. Les fissures commencent à l'axe de la pièce, en direction normale à lui et se développent vers les bords du hourdis en prenant une légère inclinaison. Celle fissuration reste concentrée au droit de l'arrière du bossage. De part et d'autre de l'axe, et sur une zone d'à peu près trois fois la demi-largeur du bossage, les aciers sont fortement sollicités, voire plastifiés, constituant une espèce de rotule.

b) Sous une charge un peu plus grande ($Fp \simeq 600$ KN) une autre fissuration apparait dans la fibre inférieure du hourdis. Ces fissures commencent sur les côtés latéraux du bossage et forment 35° à 45° avec l'axe de la pièce. Les premières apparaissent à 0.25 Lb environ de la fin du bossage (Lb = longueur bossage). Cette fissuration se développe sur tout le bord du bossage, vers l'avant de celui-ci, et se propage dans le hourdis et aussi sous le bossage, en atteignant l'axe de la pièce. A la différence de l'autre fissuration, celle-ci est très répandue. Elle s'étale tout le long du bossage et sur une largeur, de part et d'autre de l'axe, de cinq fois la demi-largeur du bossage, environ. Du fait de l'extension de la zone fissurée, les aciers ne présentent pas de fortes concentrations de tractions et restent loin de la plastification.

c) Le schéma de fissuration, au niveau de la fibre moyenne de la plaque, affecte les zones où les fissures décrites auparavant, en se prolongeant vers l'intérieur du hourdis, arrivent à fissurer la zone centrale. Elles correspondent à peu près aux zones les plus fortement fissurées, et concordent assez bien avec les endroits où les aciers sont fortement sollicités.

d) Plus tard, pour une charge un peu au dessus de celle de service ($Fp \simeq 1000$KN), s'amorce une fissuration dans la fibre supérieure du hourdis et à la base du bossage. Elle est due à la poussée au vide du câble dans la zone de raccordement avec le plan moyen du hourdis. Cette fissuration reste fine et concentrée à proximité de l'axe de la pièce.

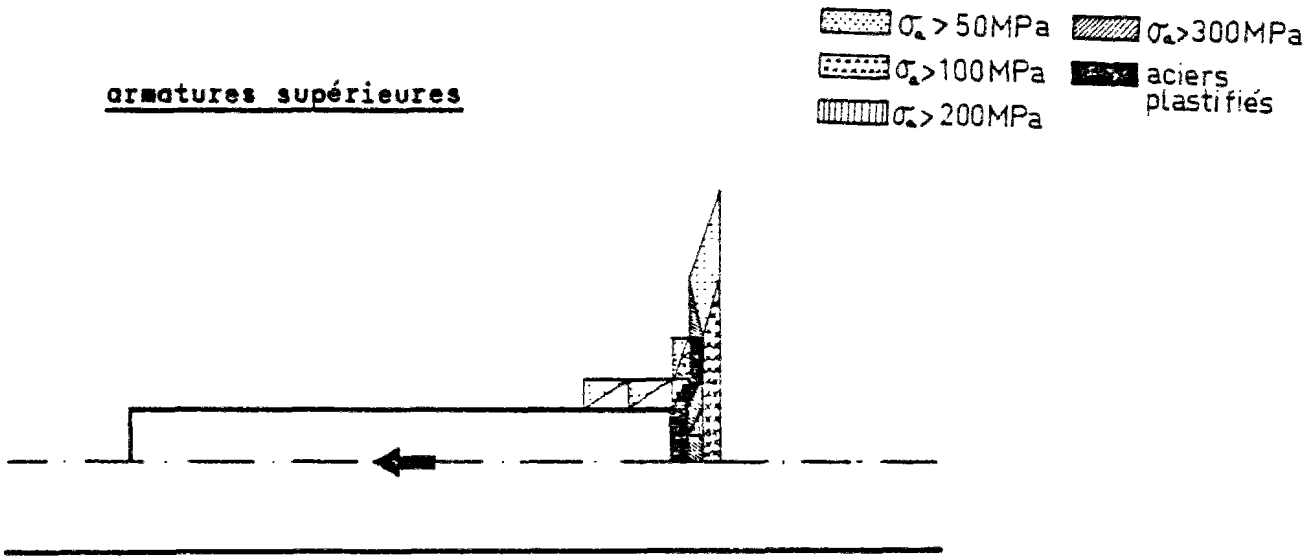
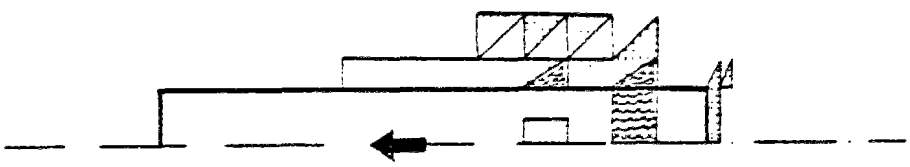


Fig. 5.64 - Contraintes dans les aciers un peu avant la rupture (Fp = 1400 KN)



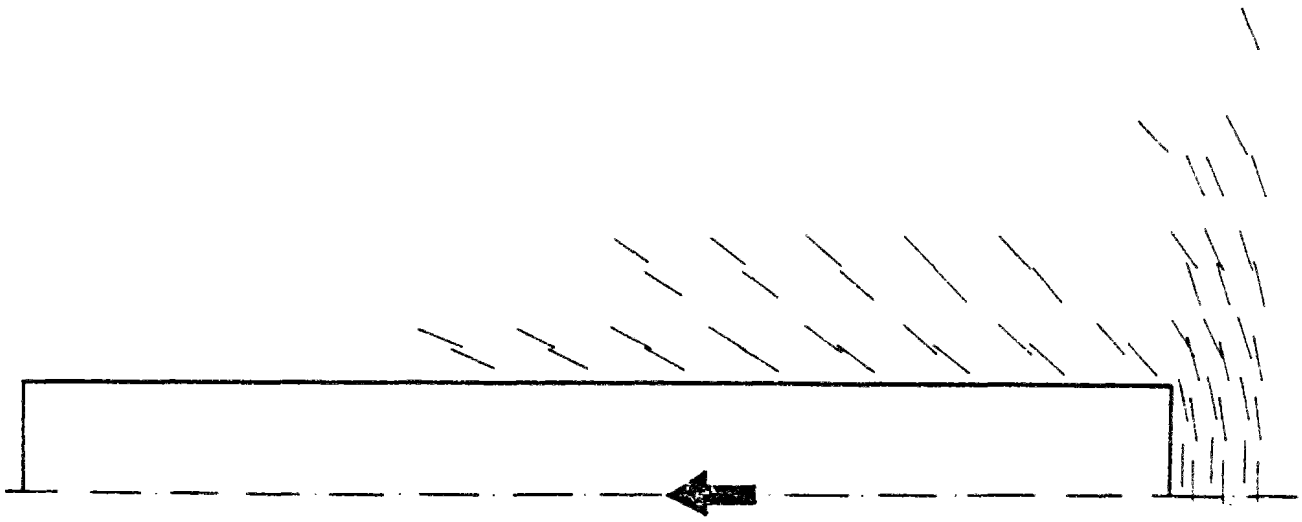


Fig. 5.65 - Directions des fissures dans la fibre moyenne (Fp = 1400 KN)

Directions des fissures dans la fibre supérieure du hourdis

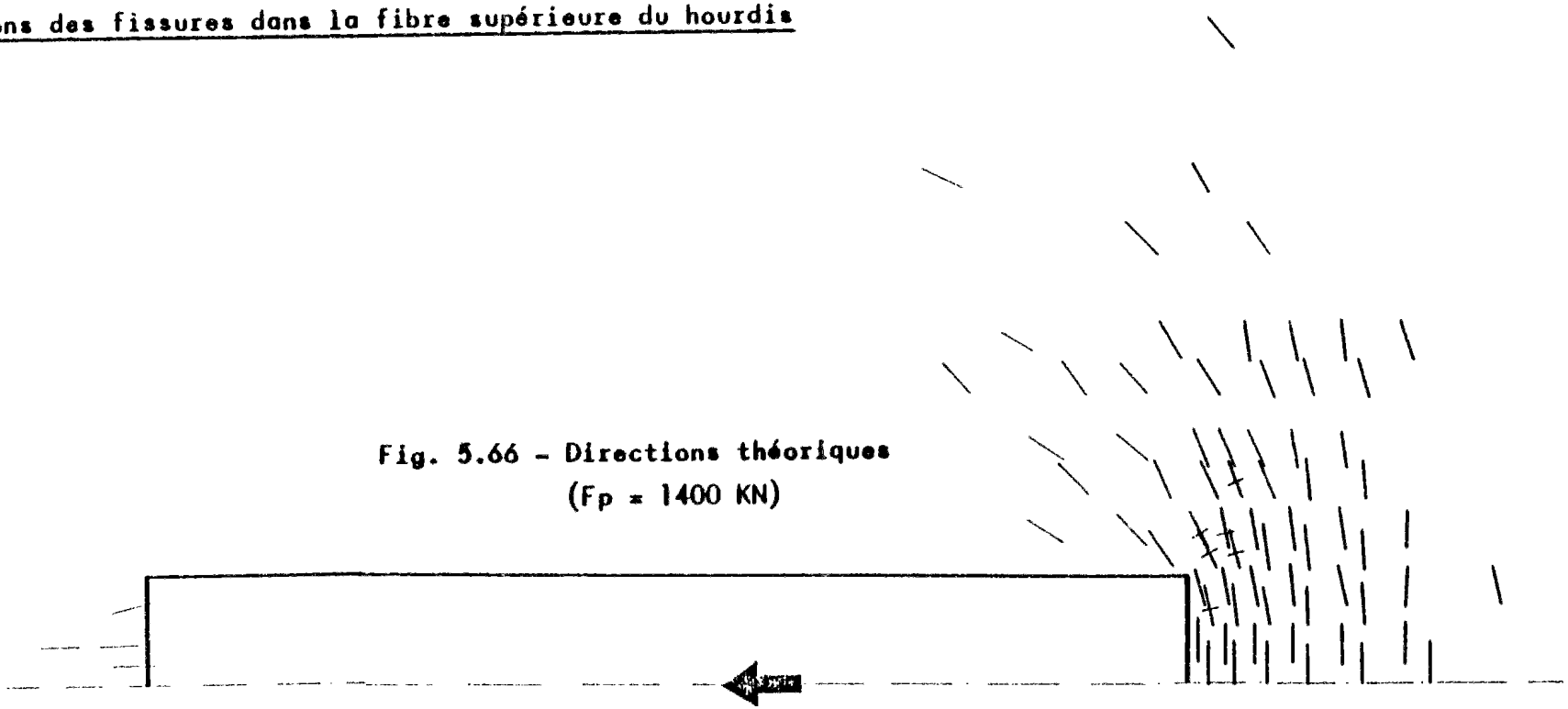


Fig. 5.66 - Directions théoriques
(Fp = 1400 KN)

HO - 2 (Fp = 1400 KN)

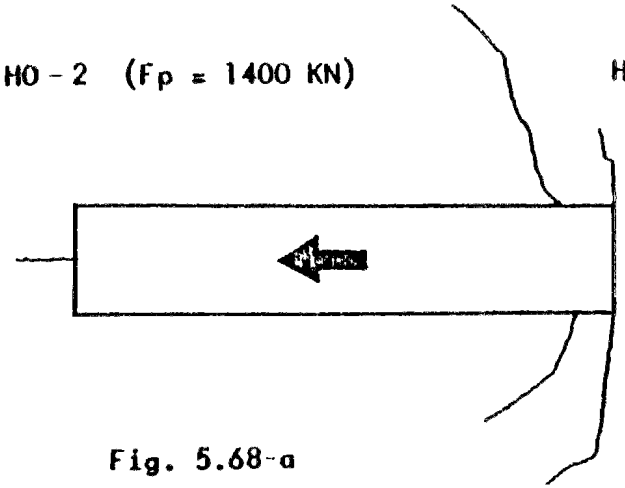


Fig. 5.68-a

HO - 3 (Fp = 1600 KN)

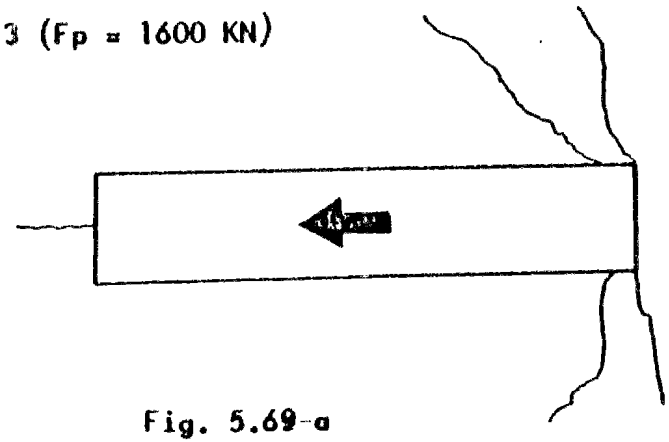


Fig. 5.69-a

HO - 4 (Fp = 1600 KN)

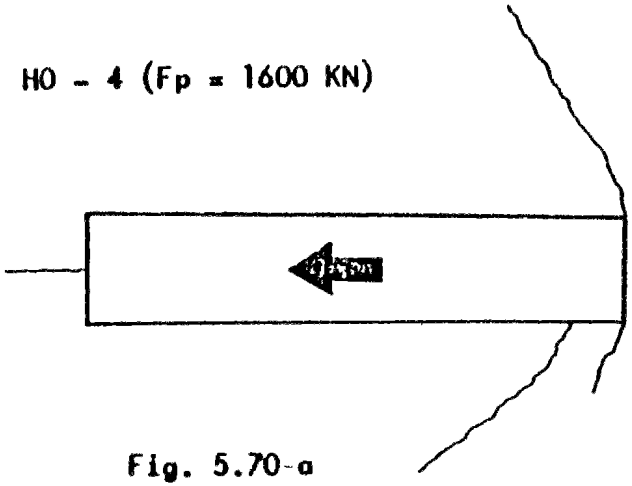


Fig. 5.70-a

Directions des fissures dans la fibre inférieure du hourdis

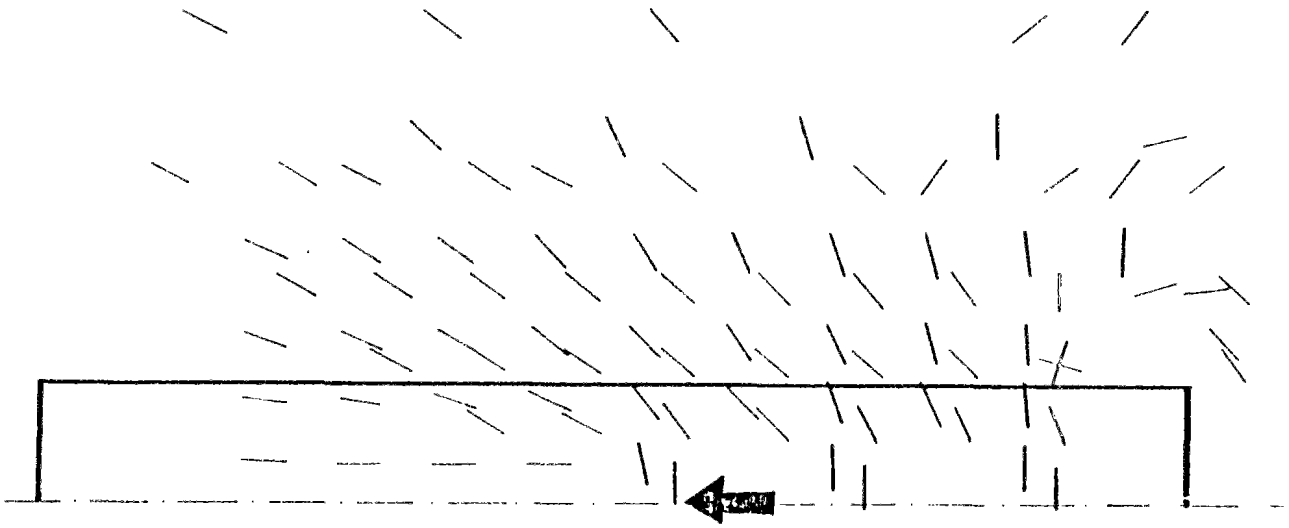


Fig. 5.67 - Directions théoriques (Fp = 1400 KN)

HO - 2 (Fp = 1400 KN)

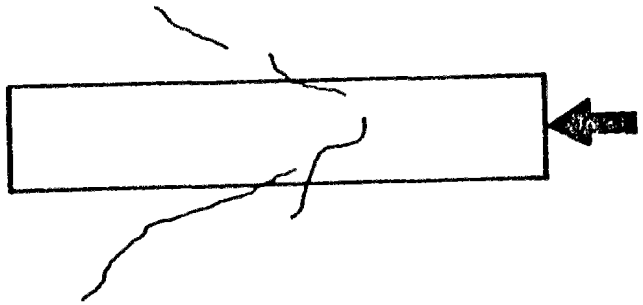


Fig. 5.68-b

HO-3 (Fp = 1600 KN)

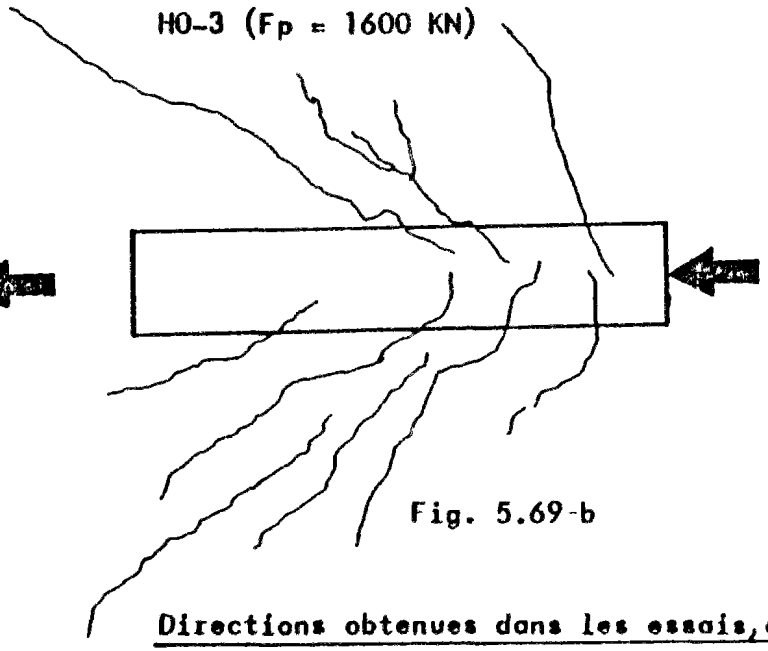


Fig. 5.69-b

HO-4 (Fp = 1600 KN)

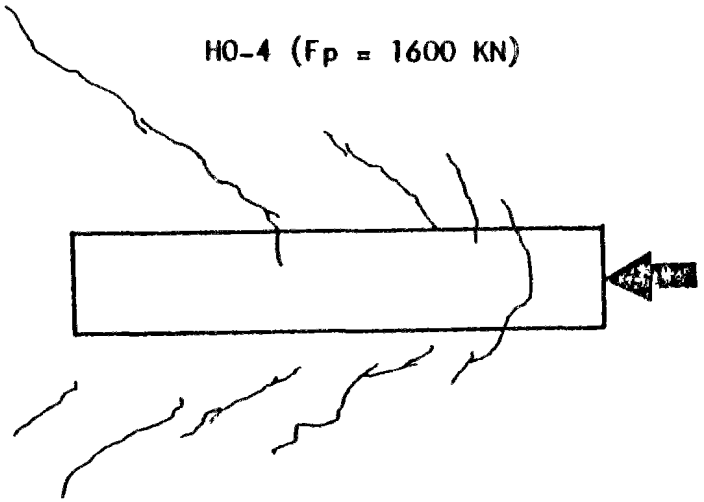


Fig. 5.70-b

Directions obtenues dans les essais, à la rupture

Fp = 200 KN

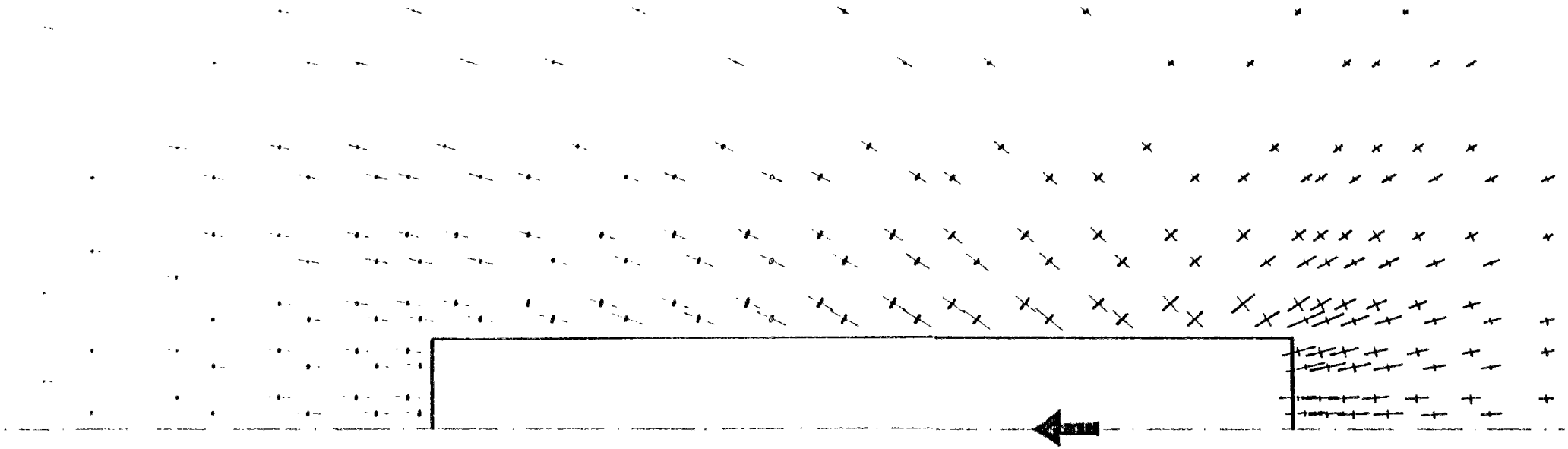
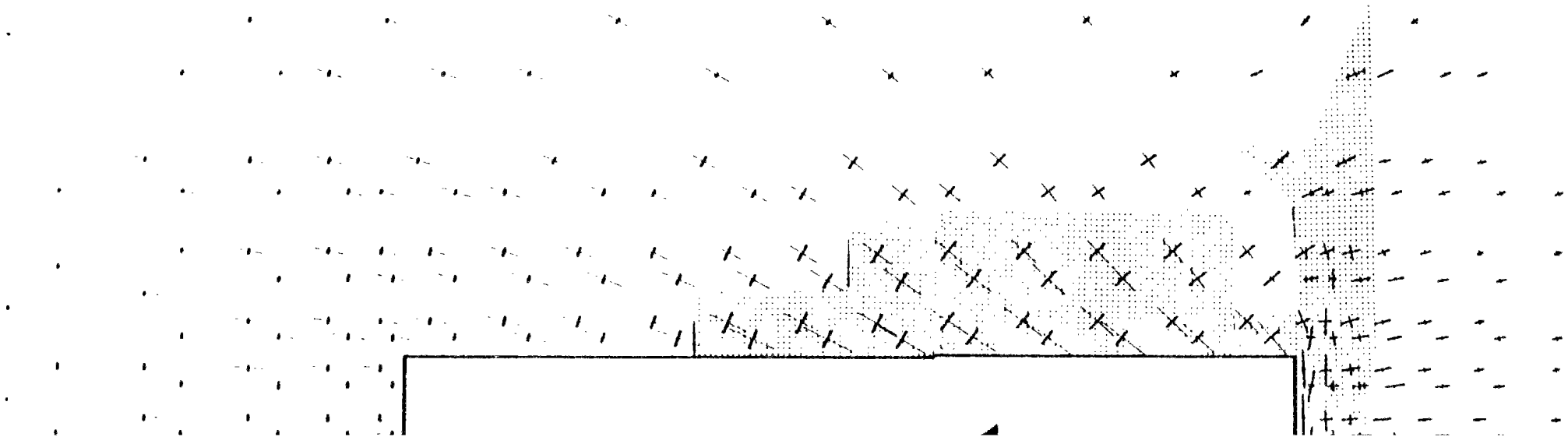


Fig. 5.71 - Diagrammes des contraintes principales dans la fibre moyenne du hourdis

Fp = 1400 KN



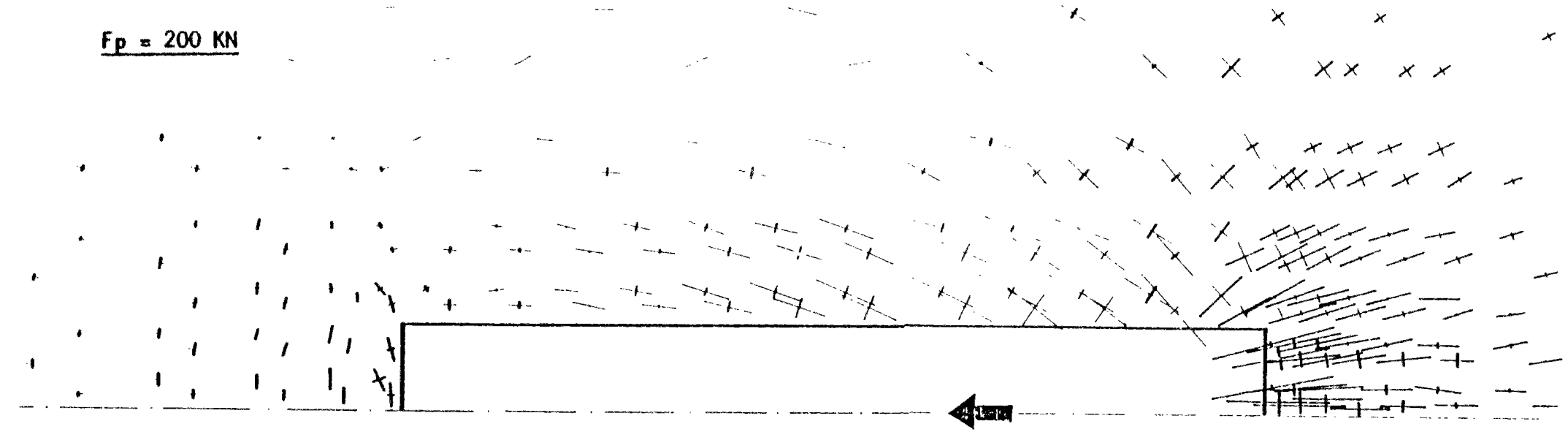
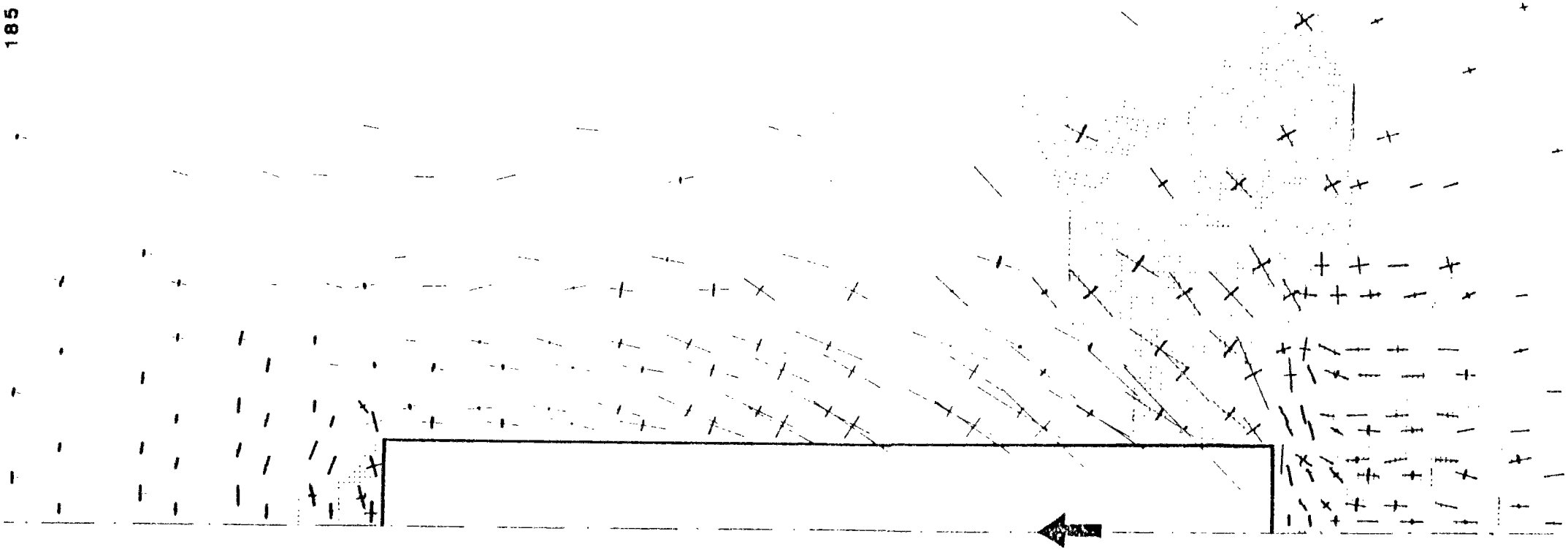


Fig. 5.72 - Diagrammes des contraintes principales dans la fibre supérieure du hourdis



Fp = 200 KN

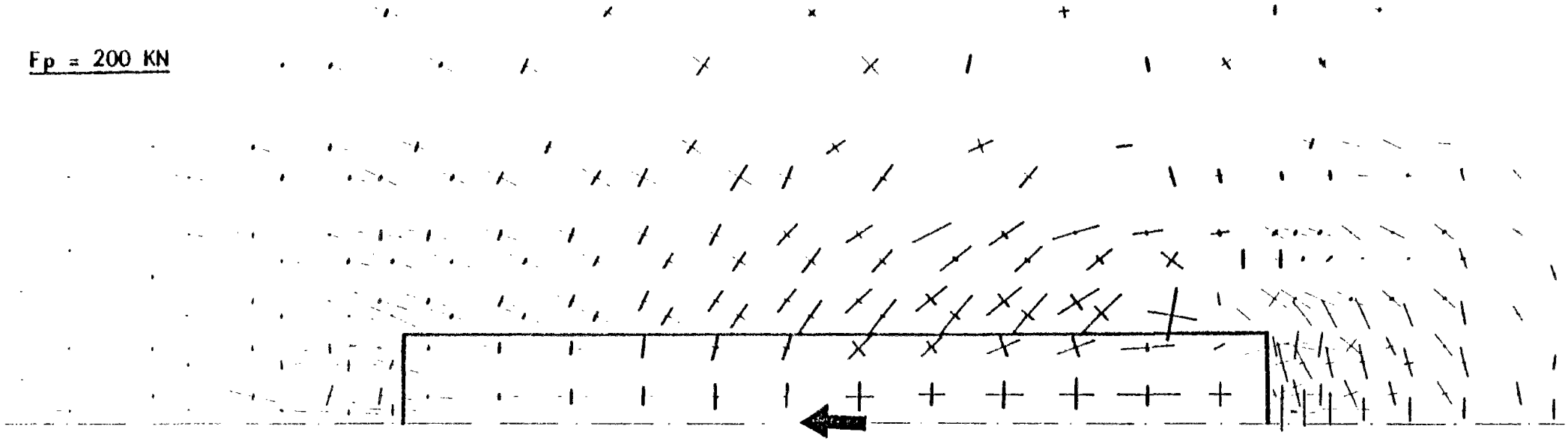
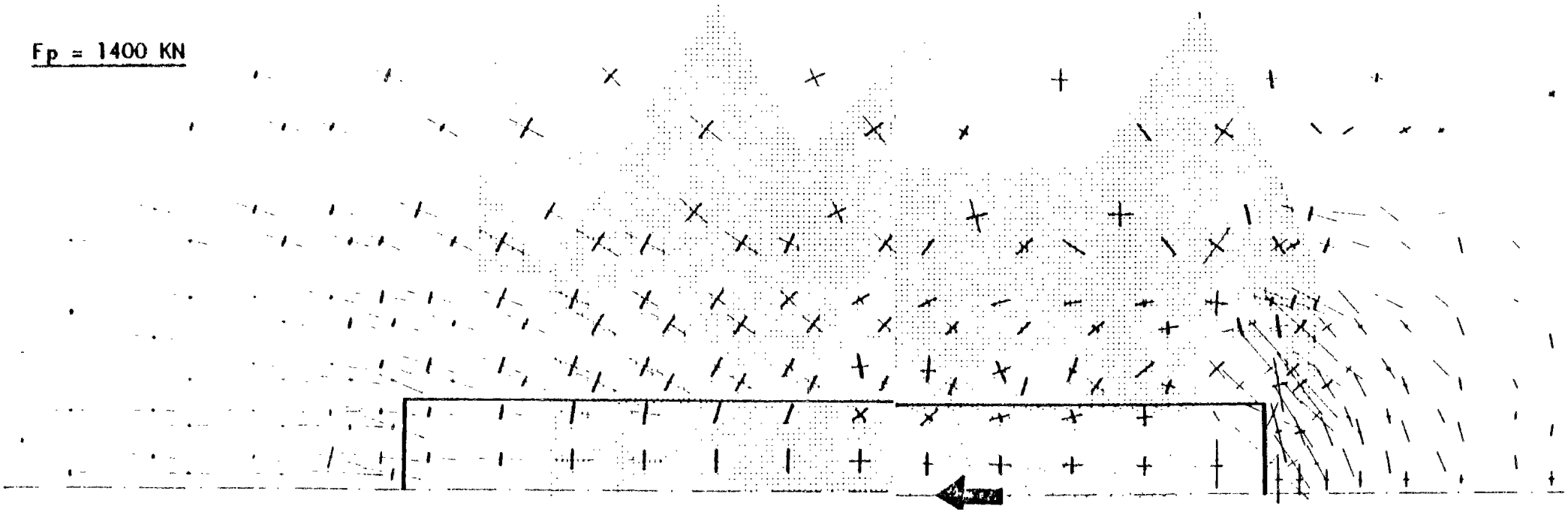


Fig. 5.73 - Diagrammes des contraintes principales dans la fibre inférieure du hourdis

Fp = 1400 KN



— Dans les figures 5.71 à 5.73 nous présentons les tracés des contraintes principales dans le hourdis, correspondant aux premiers stades du chargement (Fp = 200 KN), où la pièce a encore un comportement élastique, et un peu avant la rupture (Fp = 1400 KN), avec la fissuration assez développée.
On y remarque clairement la réduction des tractions dans les zones fissurées (zones foncées des figures), ainsi que les endroits où les tractions sont presque annhilées, et par conséquent des fissures importantes existent.
Pour Fp = 1400 KN, de fortes compressions apparaissent au niveau des fibres extrêmes, aux endroits où de grandes fissures existent dans les fibres opposées : derrière le bossage pour la fibre inférieure, et le long des bords du bossage et dans sa partie postérieure pour la fibre supérieure.
— Dans les fig. 5.65 à 5.67, nous indiquons les directions des fissures (pour Fp = 1400 KN) dans les fibres moyenne, supérieure, et inférieure du hourdis.

5.2.3. - Influence d'une traction uniforme dans le hourdis.-
— Le programme, comme nous l'avons dit au chapitre 3, ne prévoit pas de déchargements dans les lois de comportement des matériaux. Néanmoins, l'observation des résultats correspondants à la charge de service (Fp ≃ 800 KN), montre que dans aucune zone du hourdis, les compressions dans le béton n'ont atteint des valeurs importantes et que celui-ci était encore en zone linéaire.
Cela nous a permis d'étudier l'effet de l'application progressive d'une traction uniforme dansle hourdis , à partir de l'état de sollicitations correspondant à la charge de service de l'ancrage. Cette traction a été appliquée par étapes de 0.5 MPa, jusqu'à 1.5 MPa.
— A l'aide de cette méthode, on peut envisager d'étudier le déchargement possible de la zone des bossages du hourdis, sous l'effet des actions différées ou thermiques.

Le développement des fissures pour les différents taux de tractions est montré dans les fig.5.74 à 5.76. Dans la fig.5.77 nous indiquons les augmentations des contraintes de tractions, aux armatures supérieures placées en arrière du bossage.
Nous constatons une extension importante des zones fissurées, et une augmentation très marquée des tractions aux aciers, dont les valeurs sur l'axe de la pièce sont indiquées ci-après:

	Traction dans le hourdis (MPa)		
	0.5	1.0	1.5
1 cm derrière le bossage	19 %	31 %	44 %
5 cm derrière le bossage	33 %	80 %	120 %

Ces augmentations sont importantes sur toute la zone d'entraînement où le béton était déjà fissuré sous la charge de service (Fp = 800 KN).
L'application d'une traction uniforme dans le hourdis a donc deux effets importants. D'une part, elle permet une grande extension de zones fissurées sur les deux faces du hourdis et, d'autre part produit une forte augmentation des tractions dans les aciers d'entraînement, qui doit être accompagnée d'un accroisement de l'ouverture des fissures.

5.3. Comparaison avec les résultats expérimentaux.-

5.3.1. - Corps d'épreuve à échelle réduite .

Les essais de mise en précontrainte des corps d'épreuve décrits précédemment se sont tous achevés par la plastification, avec parfois des ruptures de fils, du câble de précontrainte, sous une charge de 170 KN environ. Nous y avons noté tout au plus une fissuration restée fine de poussée au vide, dans la zone du tracé courbe du câble au commencement du bossage, sur les pièces indexées A et B(pour une charge de 150 KN environ). Le béton dans le cas C était plus résistant. Les mesures relevées ont confirmé que le comportement des corps d'épreuve est resté quasiment linéaire. Les mesures obtenues une fois l'es-

fibre moyenne

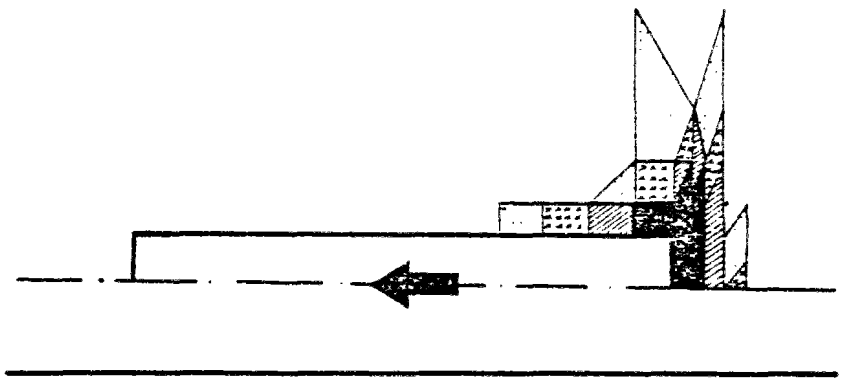


Fig. 5.74

Traction dans le hourdis

$\sigma_t = 0.0$ MPa

$\sigma_t = 0.5$ MPa

$\sigma_t = 1.0$ MPa

$\sigma_t = 1.5$ MPa

fibre supérieure

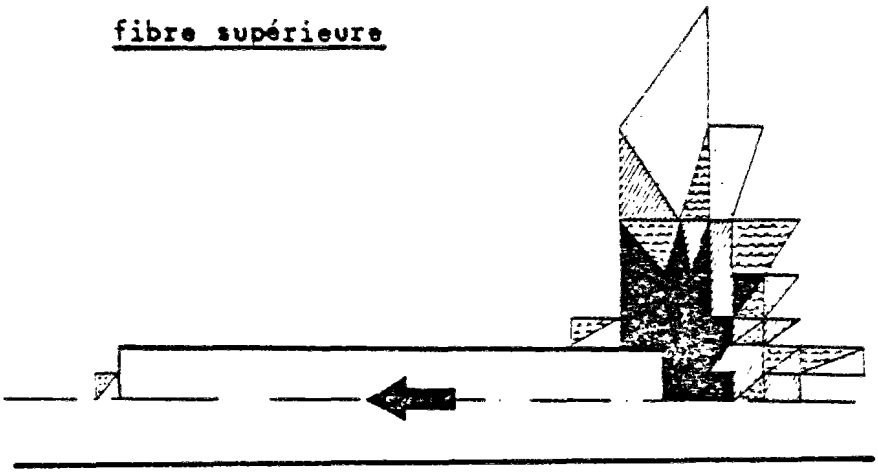


Fig. 5.75

fibre inférieure

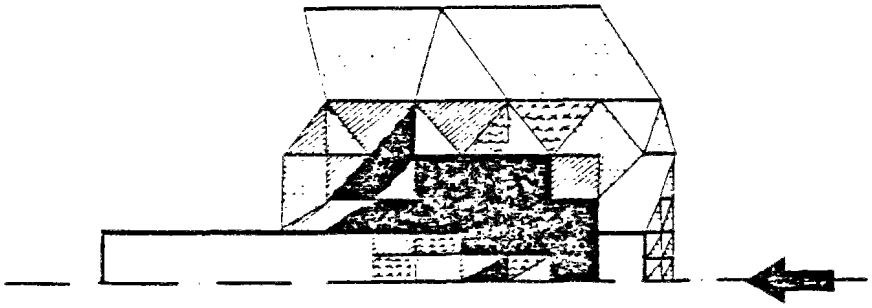
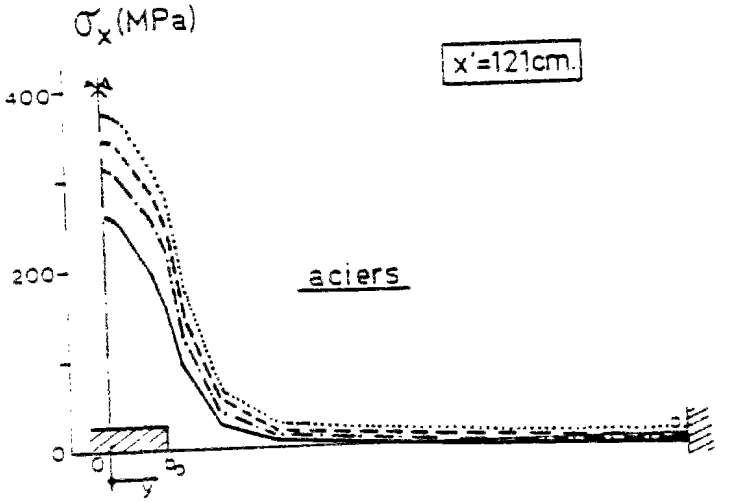
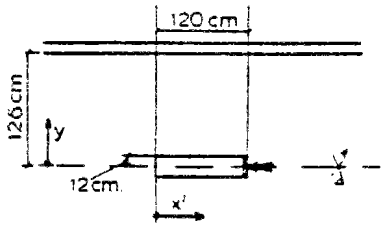
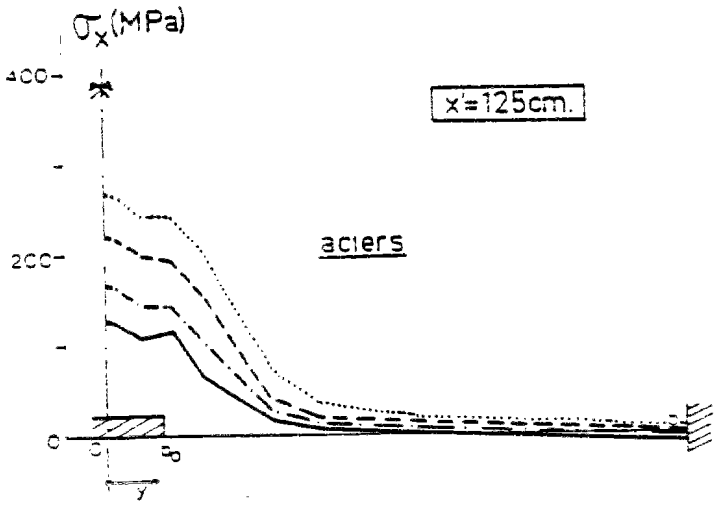


Fig. 5.76

Développement de la fissuration dans le hourdis lors de l'application d'une traction uniforme, à partir de la charge de service (Fp =800 KN)







	F_p(KN)	Traction(MPa)
———	800	0.0
—·—·—	800	0.5
- - - - -	800	1.0
·····	800	1.5

Fig. 5.77 - Variation des tractions aux armatures supérieures à l'arrière du bossage, lors de l'application d'une traction uniforme dans le hourdis à partir de la charge de service (Fp = 800 KN)

sai terminé et la pièce déchargée ont coïncidé sensiblement avec l'état zéro, sauf dans certaines zones bien délimitées (fissuration due à la poussée au vide du câble). La précompression générale n'y a donc aucune influence, si ce n'est qu'elle a permis de retarder, voire d'empêcher, l'apparition des fissures.
Cela confirme d'ailleurs les résultats obtenus avec la méthode d'éléments finis bidimensionnels (cf. paragraphe 5.2.1): l'application de la précontrainte au moyen d'un bossage se fait très graduellement sans que des compressions importantes apparaissent. Celles-ci restent très modérées et n'entraînent pas de rédistributions non linéaires appréciables, même si une précompression générale importante est appliquée.
Puisque le comportement reste en pratique dans le domaine de l'élasticité, les résultats vont être comparés avec ceux obtenus avec la méthode des coupures.

5.3.1.1. - Un seul bossage (corps d'épreuve A).-

— Les résultats sont montrés dans les fig.5-78 à 5-80. dans la fig.5.78 nous indiquons aussi ceux obtenus avec la méthode des éléments finis (en phase élastique), qui ne diffèrent à peine des valeurs obtenues avec la méthode des coupures, sauf pour la pointe des flexions juste derrière le bossage, qui est moins forte, tout en demeurant importante.
Les contraintes sont toujours rapportées à la pression d'appui p_1 = force de précontrainte/(largeur du bossage x épaiseur du hourdis = 60 cm2).

— Nous pouvons noter que la concordance entre le calcul théorique et les points expérimentaux est assez bonne sur l'ensemble des résultats. Nous pouvons déceler cependant quelques zones où la concordance est moins satisfaisante :
- Celle située devant le bossage et loin de lui, c'est à dire à la base du corps d'épreuve, dans laquelle la précontrainte devrait être déjà diffusée et les flexions annihilées. Les essais montrent l'existence de faibles flexions, dues cer-

tainement à la flexion d'ensemble de la pièce, étant donné que la fibre moyenne de la dalle est excentrée par rapport au centre de gravité de la section transversale.
Dans l'essai Ho-A2, les valeurs des compressions moyennes, une fois la précontrainte diffusée, sont plus grandes que celles de l'essai HO-A1 et s'approchent des valeurs obtenues d'après le calcul sous l'hypothèse des bords libres (fig.5.2). Cela pourrait bien découler du fait que la liaison hourdis-parois latérales, au moyen du boulonnage, est loin d'assurer une bonne transmission des efforts longitudinaux. Pour confirmer cette supposition, lors des essais à deux bossages nous avons collé des jauges sur les âmes, à proximité de la base de la pièce, ce qui va nous permettre de vérifier si la transmission de la précontrainte se fait correctement et si les parois prennent bien la partie de la charge qui leur correspond.
- Dans la zone des tractions d'entraînement, les flexions longitudinales sont un peu plus faibles que celles calculées, et les tractions au niveau du plan moyen de la plaque sont quasiment nulles, situation qui va se répéter lors des essais à deux bossages.
Il y a deux faits qui peuvent l'expliquer : d'une part, la longueur de la pièce d'essai en arrière le bossage n'est pas suffisante, de sorte qu'elle n'empêche que faiblement le déplacement du bossage vers l'avant, à cause de la précontrainte. Lors des essais en grandeur réelle (1974) on avait crée dans le bout de la pièce une espèce de poutre de rigidité, de façon à augmenter la résistance à l'entraînement de la zone derrière le bossage et à mieux simuler les conditions réelles où la pièce se prolonge bien au delà du bossage. Cela n'a pas été possible cette fois, étant donné que l'application de la précompression générale sur la pièce serait gênée par la présence de cette poutre.
Dans les essais Ho-A et Ho-B, nous pouvons dire que la resistence à l'entraînement n'existe guère, et que la partie postérieure de la pièce 'suit' le bossage sans aucune gêne, comme s'il agissait d'un ancrage aux abouts. Cela est en plus

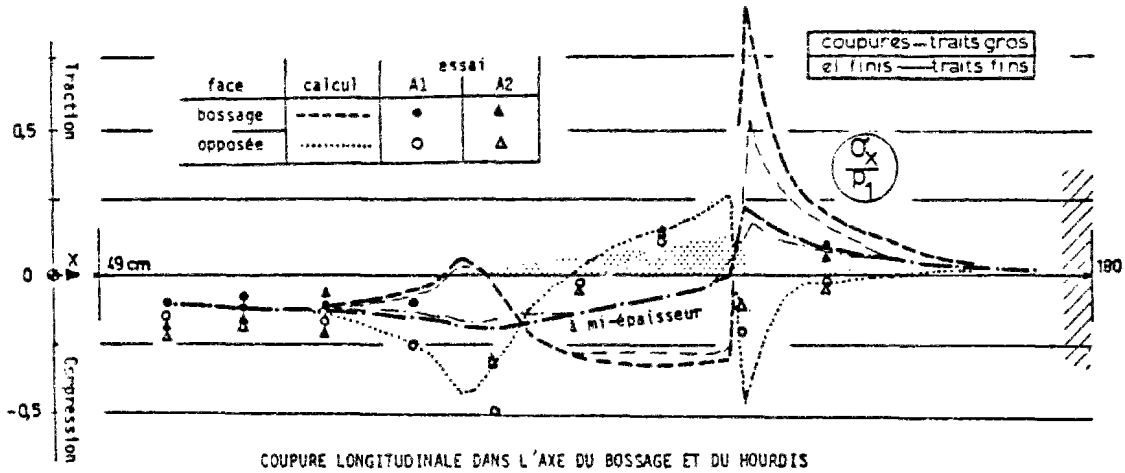
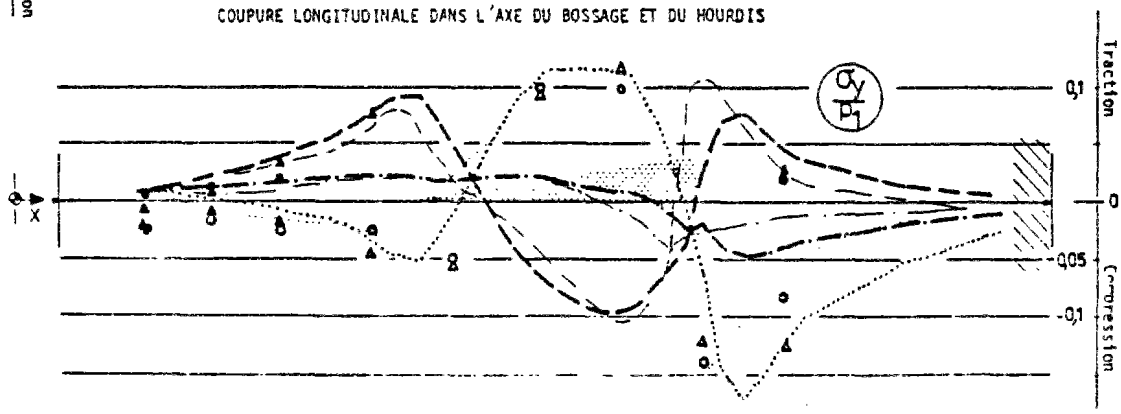
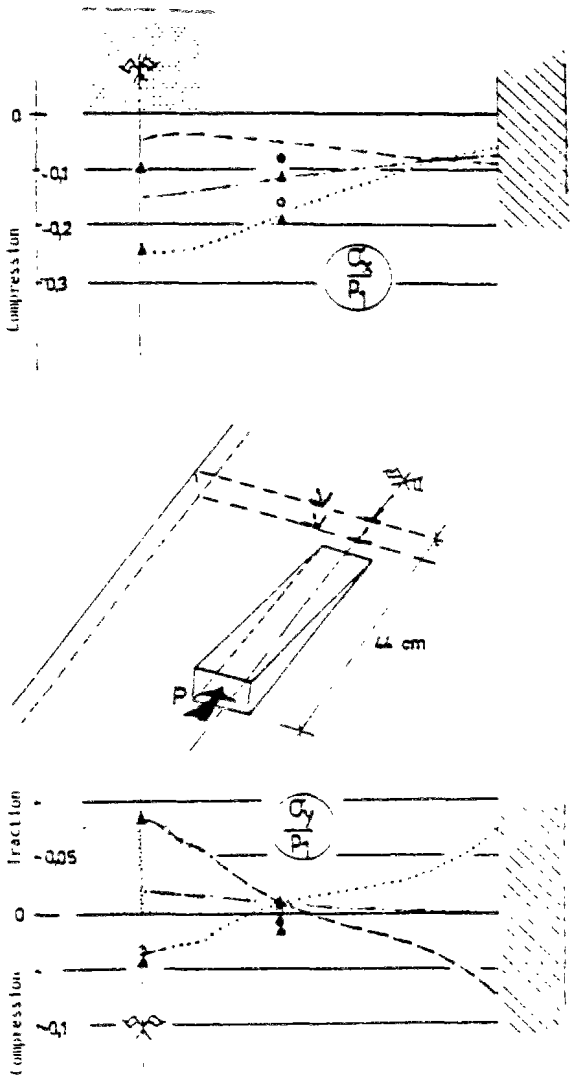


Fig. 5.78

COUPURE LONGITUDINALE DANS L'AXE DU BOSSAGE ET DU HOURDIS





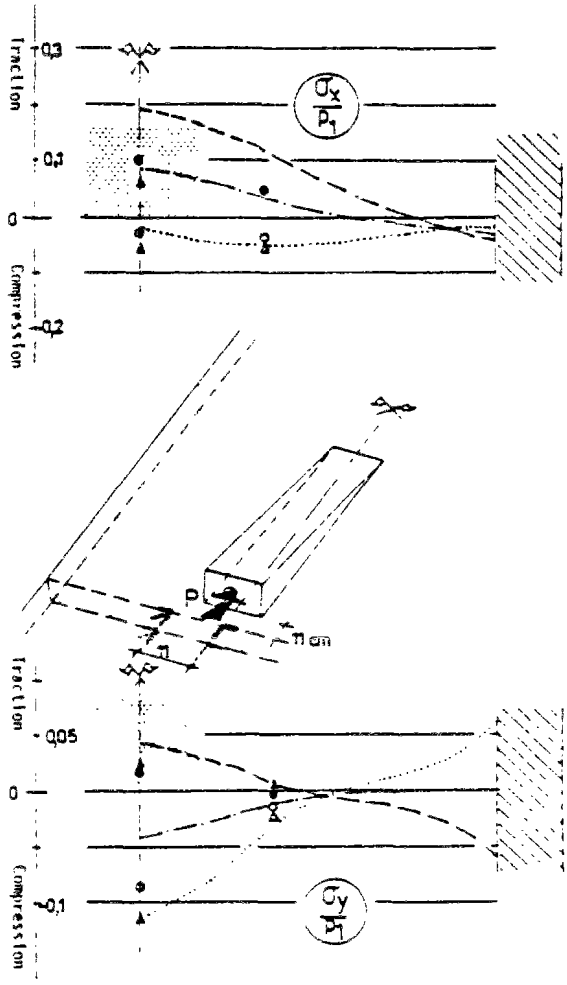


Fig. 5.79 - Coupure transversale en avant de l'ancrage

Fig. 5.80 - Coupure transversale en arrière de l'ancrage

COMPARAISON DES CONTRAINTES CALCULEES ET MESUREES (ESSAIS A)

aidé par le fait que les boulons, comme nous le verrons plus loin, n'assurent pas une bonne transmission de la force aux âmes et que, par conséquent, celles-ci gênent à peine les déplacements du hourdis.
- On peut aussi noter une grande divergence entre les résultats donnés par la jauge située à la base du bossage, dans les essais A1 et A2, ainsi que par rapport aux résultats théoriques. Cette jauge-là est placée à proximité du point de raccord du câble avec la fibre moyenne du hourdis. La grande dimension de la gaine par rapport à l'épaisseur de la plaque doit certainement y entraîner de fortes alterations des contraintes, ce qui peut expliquer les divergences obtenues.

5.3.1.2. - Deux bossages(corps d'épreuve B).-

— Les résultats obtenus sont montrés dans les fig. 5.81 à 5.84. Dans la fig. 5.81 nous avons aussi indiqué les valeurs concernant l'essai Ho-C (trois bossages), quand seuls les deux bossages antérieurs étaient chargés.
De même que dans les essais Ho-A, les compressions les plus élevées, restent dans le domaine linéaire.
L'examen des résultats montre la persistance de deux zones à faible concordance avec les valeurs théoriques :
— Dans la zone située devant le bossage, l'uniformisation des contraintes longitudinales se produit pour des valeurs beaucoup plus élevées que celles du calcul,et proches de celles obtenues sous l'hypothèse de bords libres (fig.5.23). En outre, une forte divergence est appréciée entre les résultats des deux essais (B1 et B2).
Les jauges que nous avons placées en bas des âmes du corps d'épreuve nous ont permis de confirmer que cela est dû au fait que le boulonnage est loin d'assurer une bonne transmission des efforts : Il y a toujours un jeu,laissant possible une certaine déformation entre les deux pièces.
En effet, les mesures relevées, nous ont permis d'évaluer la partie de la force qui a été reprise par le hourdis et par les parois :

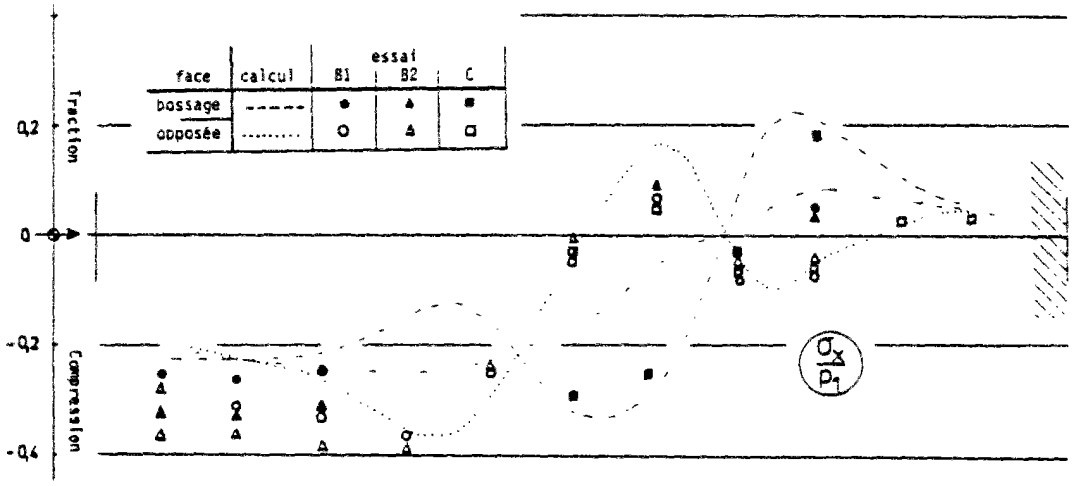
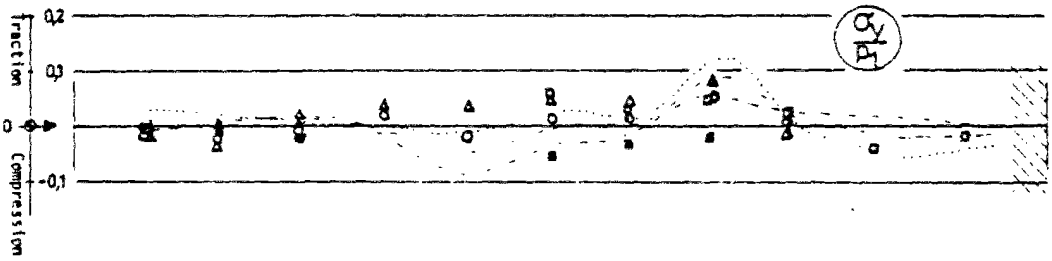


Fig. 5.81 COUPURE LONGITUDINALE DANS L'AXE DU HOURDIS



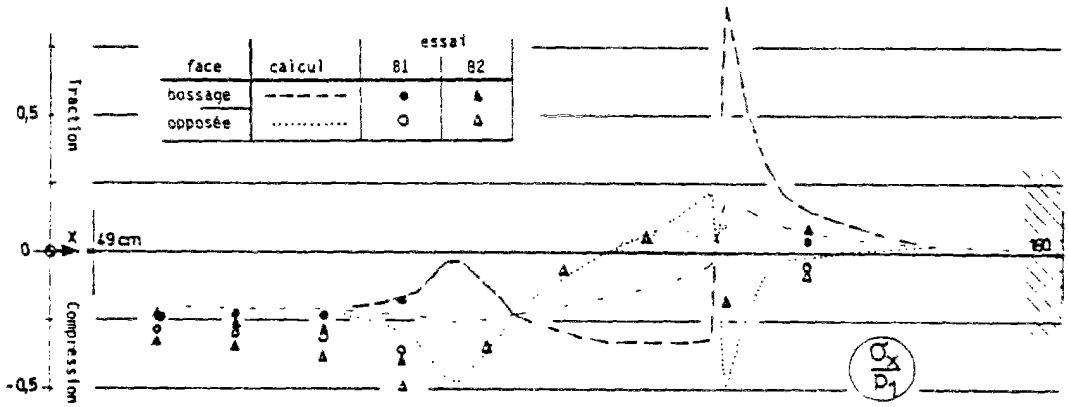
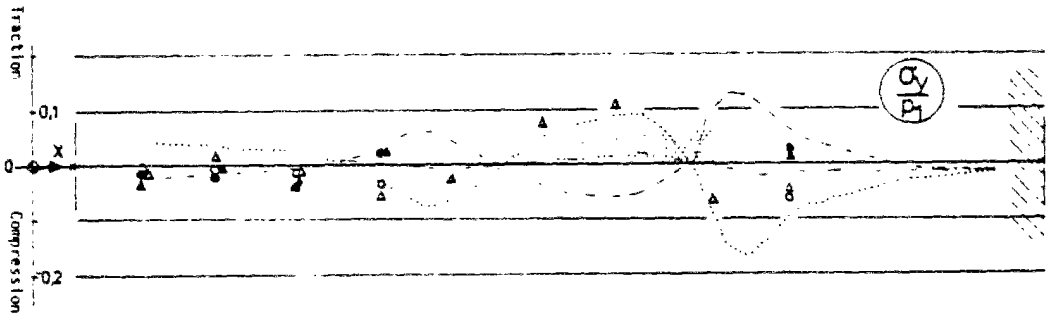


Fig. 5.82 COUPURE DANS L'AXE DU BOSSAGE Y = 15 cm



COMPARAISON DES CONTRAINTES CALCULEES ET MESUREES (ESSAIS B)

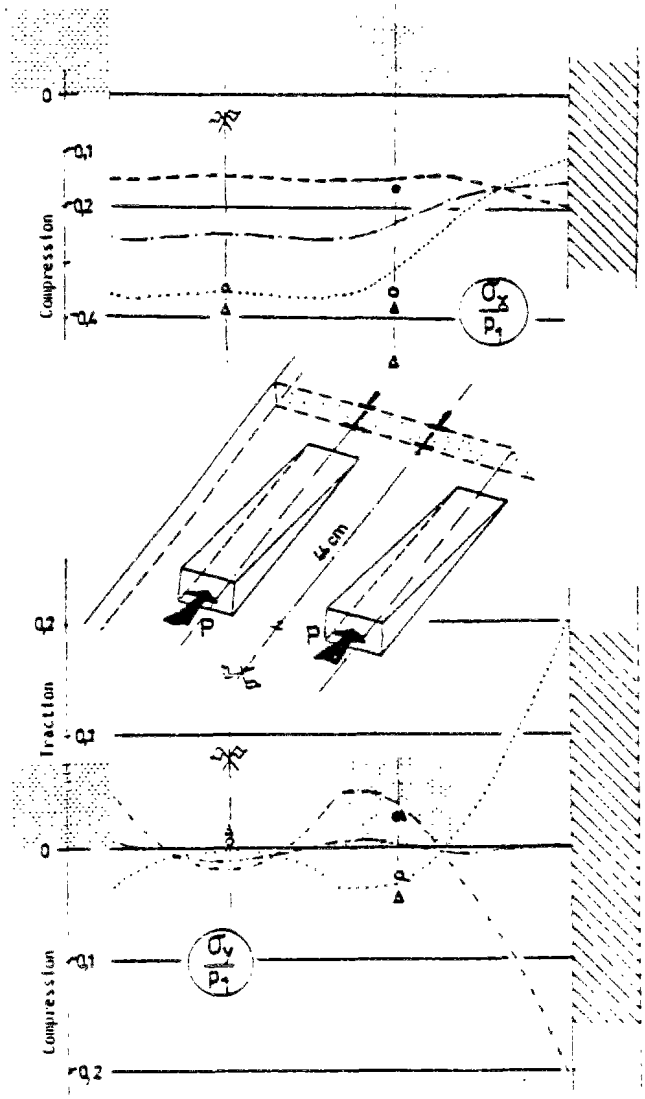


Fig. 5.83 - Répartition transversale des contraintes en avant des bossages (Essais B)

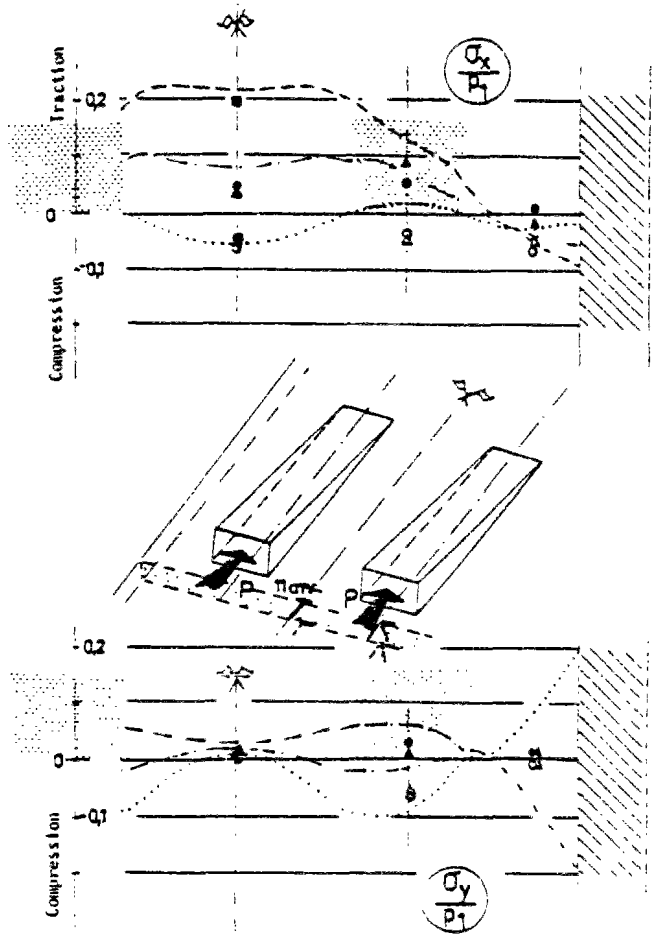


Fig. 5.84 - Répartition transversale des contrainte en arrière des bossages (Essais B)

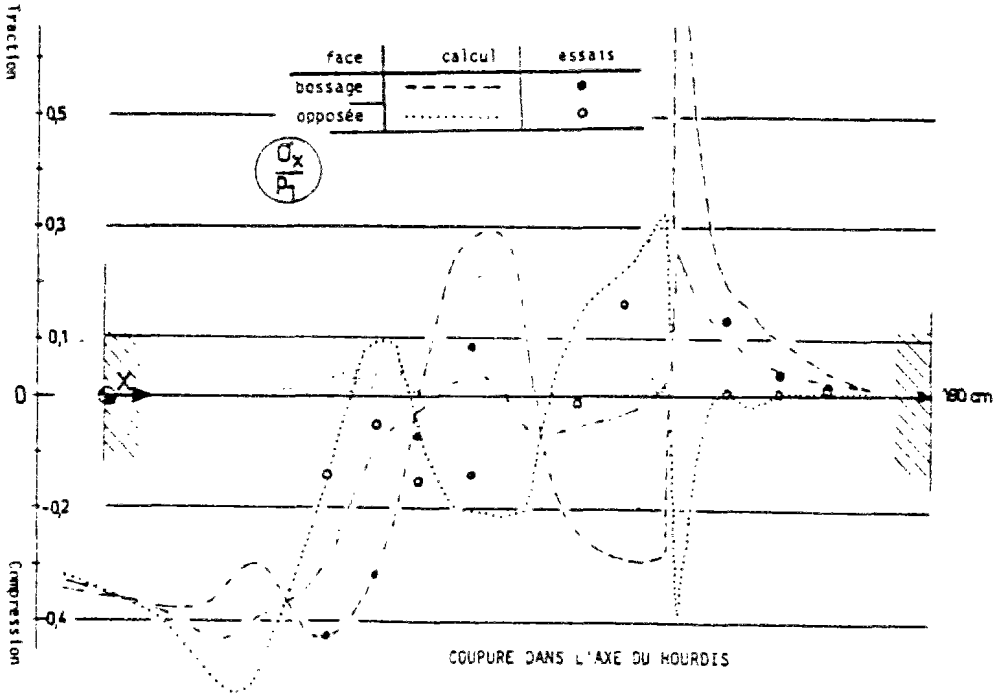


Fig. 5.85 - Comparaison des contraintes longitudinales, calculées et mesurées (Essais C)

	Hourdis	Parois
Essai Ho-B1	84 %	16 %
Essai Ho-B2	90 %	10 %
Valeur théorique en cas de transmission parfaite.	57 %	43 %

La transmission n'est donc pas représentative des hypothèses d'encastrement parfait, et par conséquent, en ce qui concerne les contraintes σ_x moyennes, on est dans ces essais beaucoup plus proche du cas de bords libres .

— Les effets sur les tractions d'entraînement sont les mêmes qu'aux essais Ho-A : les flexions sont plus faibles que les valeurs théoriques et les contraintes au niveau de la fibre moyenne de la plaque, quasiment nulles.

— Les figures 5.83 et 5.84 montrent que les flexions transversales sont nulles aux bords latéraux de la pièce, contrairement aux valeurs obtenues dans notre calcul, où nous avions supposé un encastrement parfait vis-à-vis des rotations transversales. En effet, le boulonnage n'empêche à peine la rotation transversale du hourdis, qui se fait sans gêne.

— Excepté les divergences entraînées par la mauvaise reproduction dans les essais des conditions de liaison hourdis-parois, nous pouvons remarquer que la concordance est assez bonne sauf dans la zone située entre les deux bossages (axe y = o) et proche des ancrages . L'explication, on le rappelle, provient de ce que le calcul a supposé la conservation de la planéité des sections après la déformation de la pièce, hypothèse qui représente mal le comportement réel de cette zone à relief rapidement variable.

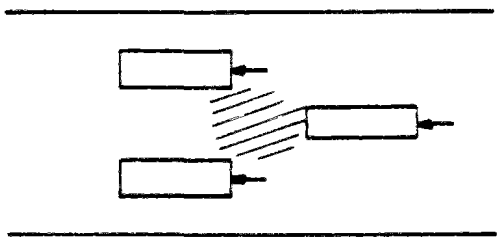
— Nous voulons aussi remarquer que l'effet de la mauvaise liaison hourdis-parois est plus sensible ici que dans les essais à un bossage. Ce qui est logique puisque les bossages sont beaucoup plus proches des bords.

5.3.1.3. - Trois bossages (corps d'épreuve C).-

— Les résultats sont montrés dans les fig.5.85 et 5.86. Lors de ce dernier essai nous avons essayé de corriger la mauvaise transmission des efforts entre le hourdis et les parois latérales, qui s'était produite aux essais précédentes: les âmes préfabriquées ont servi de coffrages latéraux au hourdis lors du bétonnage (reprise de bétonnage avec armatures en attente). D'autre part, nous avons augmenté la longueur de la pièce derrière le troisième bossage, qui était jugée insuffisante.

— Les valeurs obtenues pour les tractions d'entraînement derrière les deux bossages antérieurs quand le troisième n'était pas encore chargé (fig.5.81), ainsi que derrière le troisième, une fois chargé (fig.5.85), ont confirmé nos suppositions : les flexions sont importantes et des tractions d'entraînement appréciables apparaissent au niveau de la fibre moyenne du hourdis. Ces valeurs concordent assez bien avec les points théoriques.

— Dans le reste de la pièce, la concordance est satisfaisante sauf dans la zone située entre les trois bossages, où les fortes discontinuités géométriques qui existent, ne permettent pas, certainement, de vérifier l'hypothèse de planéité des sections.



En outre, les séries de Fourier, utilisées dans la méthode des coupures, ne s'adaptent pas très bien dans les zones où de fortes discontinuités existent. Cette zone, qui dans le calcul théorique apparaissait fortement déchargée dans les sens longitudinal et transversal, ne l'est pas autant dans la réalité.

5.3.2. - Corps d'épreuve à grandeur réelle.-

— Dans les essais réalisés sur des corps d'épreuve de petites dimensions, nous n'avons pas obtenu de contraintes hors du domaine linéaire. En outre, la présence d'une précompression générale sur la pièce a empêché la formation de fissures.
Par conséquent, nous avons appliqué le programme non linéaire au calcul des corps d'épreuve en vraie grandeur, qui ont été essayés au CEBTP en 1974.
Les résultats que nous présentons, correspondent à l'essai que nous avons analysé dans le paragraphe 5.2, et dont les dimensions sont montrées dans la figure 5.50.

— Cet essai s'est terminé par écrasement du béton du bossage, en avant de l'ancrage, sous une charge de 1450 KN. Notre calcul a donné une charge ultime de 1500 KN.

— Dans la fig. 5.87 nous présentons les déformations ε_x et ε_y sur l'axe de la pièce, pour une charge de 800 KN. Nous y rapportons les valeurs théoriques élastiques (méthode des coupures), et ceux des éléments finis.
La concordance avec les points expérimentaux est assez bonne. Néanmoins, puisqu'aucune jauge n'était placée à proximité du bossage et derrière lui, nous ne pouvons pas contrôler l'influence de la fissure qui apparaît dans l'essai sur la fibre supérieure du hourdis (fig.5.68). Cette fissure a été aussi obtenue dans le calcul par éléments finis et se traduit par une augmentation marquée des déformations de traction (aux fibres supérieure et moyenne) et de compression (à la fibre inférieure), juste derrière le bossage.

— Les jauges étaient placés dans des endroits où les phénomènes de non linéarité ne se faisaient sentir à peine. Aucune information n'existe sur la situation derrière le bossage. Nous allons donc nous contenter de comparer le développement des fissures obtenu dans l'essai avec celui théorique.
Dans la fig. 5.68, nous montrons les position et directions

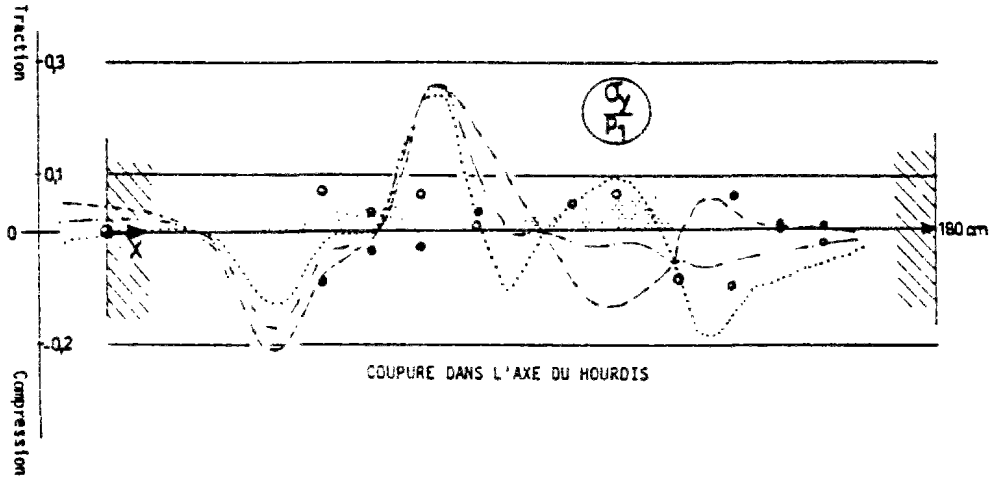


Fig. 5.86 - Comparaison des contraintes transversales calculées et mesurées (Essais C)

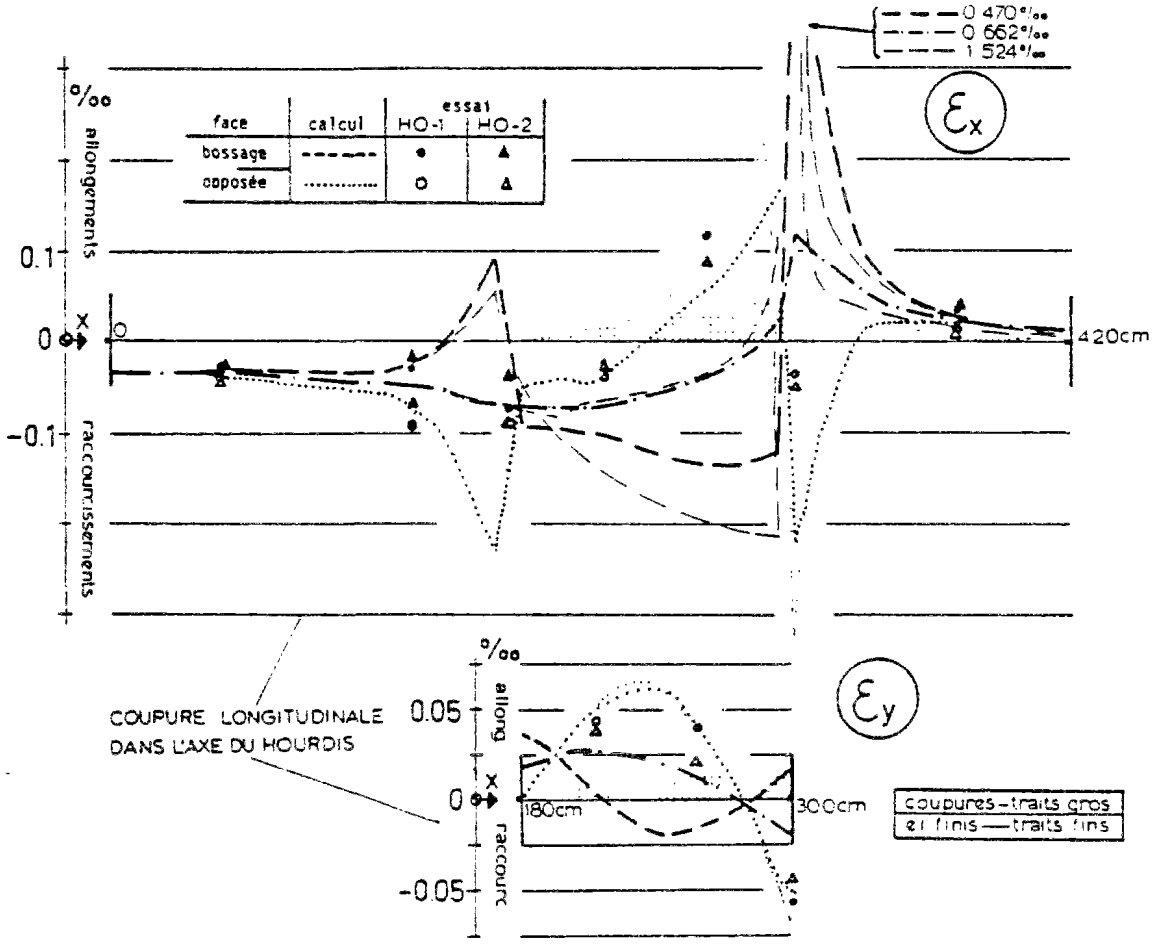


Fig. 5.87 - Comparaison des contraintes longitudinales et transversales, à l'axe de la pièce, calculées et mesurées (Essais HO)

des fissures appa rues lors des essais. Celles-ci furent obtenues sous les charges suivantes :

a) Une première fissure, dans la fibre supérieure du hourdis, et juste derrière l'ancrage, sous un effort de 800 KN.

b) Sur l'autre face de la dalle, de fines fissures inclinées vers le bas, et à un niveau sensiblement de 2/3 de la hauteur du bossage, furent observées vers 1000 KN. Ces fissures sont toujours restées très fines.

c) Une fissure longitudinale à la base du bossage et dans son plan médian, se prolongeant dans la dalle, et due à la poussée au vide du câble, apparut vers 1100 KN.

— Toutes ces fissures concordent assez bien, tant en position qu'en direction, avec celles obtenues théoriquement (fig.5.65 à 5.67). Nous pouvons cependant en tirer deux remarques :

1. - Les éléments finis donnent, en général, des fissures sous des charges inférieures à celles obtenues dans les essais Cela est particulièrement évident en ce qui concerne la fissuration derrière le bossage.

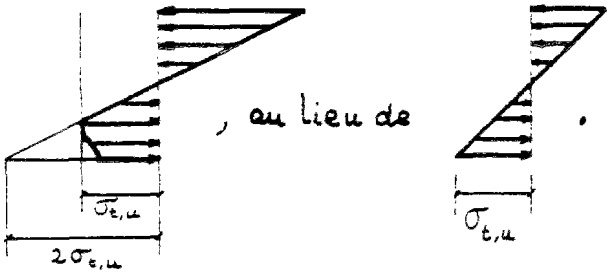
2. - Les schémas des éléments fissurés des fig. 5.61 à 5.63, semblent montrer une fissuration plus étendue qu'elle ne l'est dans les essais.

— Il y a deux raisons importantes qui peuvent expliquer cela :

a) La méthode suppose que les sections restent planes après la déformation. Cela produit une forte pointe dans les valeurs des flexions longitudinales (fig.5.51) juste derrière le bossage. Il nous paraît vraissemblable que cette pointe soit écrétée quantitativement dans la réalité, où la contuinité de la planéité des sections ne se vérifie pas, à proximité des zones à fortes variations géométriques.

b) Le modèle utilisé dans les éléments finis suppose que les couches travaillent dans leur plan indépendamment les unes des autres. Les fig. 5.62 et 5.63 montrent les couches où le béton a atteint la contrainte de rupture en traction

et, par conséquent, ne collabore plus à la résistance à flexion de la section.
Mais on a constaté depuis longtemps que la résistance conventionnelle à la traction du béton non armé, obtenue par un essai à flexion simple, et calculée par la formule de Navier : $f_{bt} = 6 M_f / b h^2$, est beaucoup plus grande que la résistance à la traction pure, le rapport entre les deux étant de l'ordre de 1.75, et fonction de la qualité du béton et de la hauteur de l'éprouvette (ref. 33).
Cela vient du fait que le béton tendu présente des déformations élastoplastiques dans la phase qui précède la rupture, avec une déformation ultime qui peut être estimée à environ deux fois la valeur élastique correspondante à la rupture.
Cela entraîne la collaboration postérieure des fibres moins sollicitées, et la fissure se produit par conséquent quand la distribution des contraintes dans la section est



Bien que ce schéma concernant la fissuration de l'éprouvette par flexion simple puisse varier du fait de la présence des armatures, où de l'existence d'un effort normal de traction ou de compression, il semble évident que les "fissures" que nous obtenons correspondent uniquement aux zones où le béton a épuisé sa capacité portante en traction, mais que les fissures apparaissent seulement dans les éléments où la déformation de traction du béton dépasse une certaine limite, qui est plus élevée que la limite élastique. Ces éléments-là sont ceux dont les armatures sont fortement sollicitées et que nous montrons dans la fig. 5.64. Nous remarquons qu'ils concordent à peu près avec les éléments dont la fibre moyenne

a atteint la contrainte de rupture en traction (fig.5.61). Nous constatons aussi que l'extension de ces zones correspond assez bien avec celle des fissures obtenues dans les essais (fig.5.68).

— Les contraintes obtenues dans les aciers confirment d'autre part certaines observation expérimentales : les fissures sur la fibre supérieure du hourdis, derrière le bossage, restent très localisées et s'ouvrent de plus en plus (le calcul théorique montre la plastification des aciers à cette zone-là). Par contre, la fissuration sur l'autre face du hourdis est assez répandue, mais les fissures demeurent toujours fines.

— A titre d'exemple, nous montrons les fissures obtenues à la rupture sur deux corps d'épreuve (Ho-3 et Ho-4) où l'épaisseur du hourdis était plus petite (15 cm) et la qualité du béton moins bonne (fig. 5.69 et 5.70). La fissuration dans le hourdis s'y est développée beaucoup plus, mais elle reste en bon accord en position et en direction avec ce que nous avons obtenu théoriquement.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS

Les conclusions, tant théoriques qu'expérimentales, que nous pouvons tirer de cette recherche, peuvent être résumées comme suit :

— Le problème de la résistance de cette partie d'ouvrage peut être cerné en abordant séparément les quatre points suivants:

a) la diffusion de la force de précontrainte dans le bossage ;

b) l'étude du plan de couture d'attache du bossage au hourdis ;

c) l'équilibre de la poussée au vide induite par la courbure du câble ;

d) la répartition des contraintes dans le hourdis au voisinage du bossage.

Les points a) et b) ont été étudiés en détail au LCPC (réf. 7 et 8). Une seule remarque à faire : bien que le calcul élastique donne une transmission par cisaillement à travers le plan d'encastrement du bossage, nous avons constaté lors des essais Ho-1 (réf . 9) que, par suite de la fissuration à l'arrière du bossage, ce mécanisme peut être remplacé par celui de console courte, qui entraîne une forte sollicitation des armatures de couture proches de l'aplomb de l'ancrage, pouvant même arriver jusqu'à la plastification.

Le point c) est bien comme en béton armé. Néanmoins, il faut aussi considérer le cumul des effets avec ceux de la sollicitation du hourdis dans la zone, dont nous parlerons ci-après.

— Nous avons centré notre étude sur le point d) en particulier. Les deux méthodes que nous avons mises au point ont montré une assez bonne concordance avec les résultats expérimentaux, à l'exception de quelques zones particulières où les hypothèses de calcul ne s'appliquent pas. Voici les principales limitations que nous avons relevées :

a) Pour la <u>méthode des coupures</u>, d'une part son analyse élas-

tique ne permet pas de tenir compte des redistributions importantes de contraintes qui se produisent, et d'autre part l'hypothèse de conservation des sections planes ne se vérifie pas à proximité des zones à forte discontinuité géométrique. Ce qui est aggravé par la mauvaise convergence des séries de Fourier dans ces zones là.

b) Les <u>éléments finis</u> adoptent aussi l'hypothèse des sections planes.

Le modèle choisi pour le béton comporte aussi quelques limitations :

1. - les couches sont supposées travailler dans leur plan, indépendamment les unes des autres, et sous un état biaxial de sollicitations ;

2. - les lois biaxiales adoptées pour le béton ont été obtenues en maintenant constant le rapport des contraintes dans les deux directions de chargement. Cependant, les effets non linéaires (la fissuration principalement), peuvent entraîner des variations sensibles des contraintes principales, en direction et en grandeur ;

3. - nous avons adopté quelques paramètres approchés, dont l'influence n'a pas pu être évaluée, en particulier ceux qui approchent la collaboration du béton tendu entre fissures et la résistance à la déformation transversale du béton fissuré.

Nous voulons finalement signaler que l'utilisation d'un élément non conforme (imposée par la limitation de capacité d'ordinateur), peut entraîner quelques imprécisions dans les zones à forte variation de courbure.

— Nous avons constaté la présence de trois zones de flexions longitudinales importantes, qui sont accompagnées par des flexions transversales de même signe, et qui produisent des tractions élevées dans le hourdis :

a) Derrière le bossage, avec des tractions σ_x sur la face côté bossage. Le calcul y donne une pointe aiguë très

localisée à la discontinuité géométrique du bossage, laquelle ne peut pas être vérifiée par un moyen quelconque de mesure. Il nous semble que, quoique sensiblement écrétée en réalité, elle doit rester très élevée.

b) Le long du bossage, et sur une zone de 0.6 à 0.75 Lb à partir de l'ancrage (Lb étant la longueur du bossage), il existe des tractions sur la face opposée au bossage. Les tractions principales sur les bords latéraux du bossage, forment un angle compris entre 30° et 45° par rapport à l'axe de la pièce,et atteignent leur maximum à 0.25 Lb de la fin du bossage. Ces tractions sont importantes.

c) A la base du bossage, s'étendant aussi sur le hourdis, on trouve des tractions transversales σ_y , dues à la poussée au vide de la partie courbe du câble. Elles sont plus faibles que celles des zones précédentes.

— L'état de contraintes au niveau du plan moyen de la plaque est beaucoup moins critique. En effet, la présence du bossage répartit l'application de la précontrainte sur le hourdis, qui se fait graduellement sur toute la longueur du bossage. Il y a donc un double mécanisme de diffusion de la précontrainte sur le hourdis : par cisaillement le long du bossage, et par entraînement de la zone arrière. Au niveau de la base du bossage, une grande partie de la précontrainte est déjà diffusée, ce qui rend négligeables deux effets propres aux ancrages aux abouts des pièces : les tractions transversales d'éclatement, et les fortes accumulations des compressions devant l'ancrage. Les tractions d'entraînement derrière le bossage, bien que accrues par l'effet défavorable de la brusque discontinuité géométrique de la fin du bossage (cf .5.2.1.), sont à leur tour nettement plus faibles que celles obtenues derrière les ancrages noyés.

— Les valeurs des tractions sont fonction des dimensions relatives du bossage et du hourdis.

La résultante des tractions d'éclatement au niveau du plan

moyen du hourdis, Ty,moy., est toujours très faible et varie entre 0.10 et 0.18 de la force de précontrainte (Fp).
Celle des tractions d'entraînement (Tx,moy) derrière l'ancrage, reste toujours en dessous de la règle empirique qui consiste à ancrer 0.5 Fp. Elle augmente quand γ (γ = largeur bossage/ largeur hourdis) diminue, et s'approche seulement de 0.5 Fp quand γ tend vers zéro (ancrage interne dans un milieu infini).
Les valeurs des flexions au milieu et derrière le bossage, se sont avérées être très sensibles à l'excentrement du câble par rapport au centre de gravité des sections du bossage, qui doit par conséquent être réduit au maximum.

— Au cas où le bossage est proche des bords, le calcul élastique donne de très fortes flexions transversales à l'encastrement avec les parois latérales, avec apparition de tractions très importantes sur la face côté bossage, dans la zone située au droit du bossage.
La réalité devrait être moins critique, étant donné que notre calcul a supposé que les rotations transversales φ_y étaient nulles le long de la ligne de jonction hourdis-parois, alors qu'en réalité une certaine rotation existe. Ces flexions deviennent rapidement négligeables quand le bossage s'éloigne des bords. En tout cas, nous pensons qu'il faudrait en tenir compte, si $\gamma > 0.10$.

— Un calcul qui ne considère pas les conditions d'encastrement du hourdis aux parois latérales du caisson (calcul à bords libres) s'avère être nettement du côté de l'insécurité.
Notamment, nous avons constaté qu'il fournit :
a) des tractions d'entraînement au niveau de la fibre moyenne plus faibles (réduction de 35 % environ pour $\gamma = 1/6$) ;
b) des flexions transversales négligeables (de l'ordre de 50 % pour $\gamma = 1/6$) ;

c) des flexions longitudinales très faibles derrière le bossage (réduction de 60 % environ pour $\gamma = 1/6$). Ces flexions apparaissent en plus très concentrées autour de l'axe du bossage et s'annulent très vite de part et d'autre de l'axe (ht = 0.4 à 0.5 b au lieu de 0.7 b si l'on considère l'encastrement, cf.5.1.2.2).

— Le calcul non-linéaire a d'une part confirmé les distributions élastiques obtenues avec la méthode des coupures et, d'autre part donné des renseignements sur le comportement du hourdis en phase fissurée, dont il faudrait tenir compte lors du dimensionnement des armatures.

Un accord acceptable a été obtenu entre la position, direction et propagation des fissures théoriques et celles obtenues aux essais.

Le calcul et les essais ont montré que la fissuration est la seule cause de non linéarité du hourdis. L'application de la précontrainte par l'intermédiaire d'un bossage évite l'apparition de compressions élevées.

Nous avons remarqué trois types de fissures :

a) Une première fissuration, sur la fibre supérieure du hourdis, juste derrière le bossage.

Cette fissuration reste très concentrée et sollicite fortement les sections situées derrière le bossage, où se forme une espèce de rotule avec les aciers supérieurs très sollicités. Nous y avons obtenu une plastification des armatures pour une charge d'environ une fois et demie celle de service. La forte rotation de ces sections permet d'attendre de graves ennuis, même sous la charge de service, si cette zone-là n'est pas suffisamment armée.

b) Une deuxième fissuration apparaît sur la fibre inférieure du hourdis, le long du bossage. Elle commence à 0.25 Lb de l'ancrage, et se développe vers l'avant. Les fissures restent fines et très étendues en largeur et en longueur. La zone affectée par la fissuration est bien plus étendue que celle obtenue par le calcul élastique, les fissures pouvant se développer jusqu'au niveau du début du bossage et même le dépasser. Les aciers les plus sollicités sont ceux situés aux

bords latéraux du bossage, sans pour autant atteindre une traction élevée.

c) Une fine fissure, due à la poussée au vide du câble, a été détectée un peu avant la rupture. Elle se produit à la base du bossage, en se prolongeant dans le hourdis, et reste toujours très fine.

— Pour le cas étudié, nous avons obtenu à la rupture, une fissuration étalée sur une largeur de 5 bo environ, de part et d'autre de l'axe de la pièce (bo étant la demi-largeur du bossage). Les armatures supérieures de derrière le bossage se sont plastifiées sur une zone de 3 bo de part et d'autre de l'axe.

— L'étude des résultats du calcul non-linéaire permet de tirer une conclusion importante :

Même si la résultante des tractions d'entraînement derrière le bossage est nettement en dessous de 0.5 Fp et si la partie effectivement reprise par les aciers est encore plus faible (0.29 Fp à la rupture pour le cas étudié), un dimensionnement correct des armatures doit tenir compte de :

a) dans la section juste derrière le bossage, il existe une très forte flexion qui tend la fibre supérieure. Le ferraillage doit donc y être disposé de façon à reprendre cette flexion ;

b) transversalement, on doit concentrer les aciers derrière le bossage.

Sinon, on risque d'avoir une forte fissuration dans cette zone, avec des grandes ouvertures et plastification des aciers.

— Au cas où plusieurs bossages doivent être placés dans une zone limitée, nous pensons qu'une distribution décallée des ancrages est toujours préférable. En effet, la compression des bossages postérieurs apporte dans ce cas une influence favorable vis-à-vis de la fissuration de ceux de l'avant, en y réduisant les tractions d'entraînement.

Nous constatons aussi que, dans les cas où deux bossages sont relativement proches, les trois différentes zones de flexions

longitudinales déjà citées s'étalent sur toute la zone comprise entre les deux bossages.
En outre, il faut noter que l'accord entre les contraintes transversales théoriques et expérimentales n'a pas été bon dans la zone située entre des bossages proches. Cela vient du fait que les hypothèses de calcul ne simulent pas bien le comportement réel de cette zone à relief rapidement variable.

— Les résultats théoriques et expérimentaux que nous avons obtenu en appliquant une force de précontrainte, par l'intermédiaire d'un bossage, sur un hourdis où l'on avait appliqué auparavant une compression générale, mettent en évidence que celle-ci ne suffit pas à solliciter le béton hors du domaine élastique. La précompression générale n'y a donc aucune influence, si ce n'est qu'elle permet de retarder l'apparition des fissures, en réduisant entre autres la traction d'entraînement.

— Par contre, l'analyse des effets d'un déchargement progressif du hourdis, dans lequel on a placé un bossage avec un câble tendu à sa charge de service, montre que des taux de traction modérés entraînent des dégradations importantes dans le hourdis (extension des zones fissurées sur les deux faces, et ouverture importante des fissures, accompagnée d'une forte augmentation des tractions aux aciers supérieurs, dans la zone en arrière du bossage).
On a donc fortement intérêt à éviter de placer les bossages dans des zones qui risqueraient de se trouver sollicitées en traction.

— Les conclusions précédemment énumérées nous permettent de fixer quelques critères concernant les dispositions constructives (fig. 6-1 à 6-4) :
a) Les directives du règlement concernant les abouts de poutre (ref. 2) sont transposables au cas du bossage moyennant deux adaptations : les armatures destinées à résister aux tractions de surface doivent être prolongées et

ancrées par boucles fermées jusqu'à la face inférieure de la plaque ; le dimensionnement des armatures d'éclatement doit prévoir que le maximum des tractions se trouve à la surface .
b) Les armatures de couture peuvent être déterminées suivant la règle des coutures (pour reprendre un effort tranchant égal à $F_p \cos \alpha$).
Un renforcement des armatures de couture est conseillé dans la zone proche de la plaque de répartition, en vue d'assurer une sécurité suffisante vis-à-vis d'une rupture suivant un mécanisme de console courte.
c) Des armatures transversales supplémentaires doivent être placées dans la zone de courbure du câble pour reprendre la poussée au vide de celui-ci.
d) L'ancrage doit être appliqué le plus proche possible de la face supérieure du hourdis. Il est aussi favorable d'augmenter un peu la hauteur du bossage, de façon à ce que l'excentrement du câble par rapport aux centres de gravité des sections du bossage soit réduit au minimum.
Le raccordement du câble à la fibre moyenne du hourdis devrait se faire si possible à l'intérieur du bossage, en vue d'accroître l'enrobage de celui-là dans la zone de poussée au vide.
e) On peut disposer les aciers en treillis suivant deux nappes. La répartition sur les deux nappes doit se faire de façon à reprendre les flexions longitudinales et transversales qui apparaissent : renforcement de la face supérieure derrière le bossage, de l'inférieure le long de celui-ci, et encore de la face supérieure dans la zone de courbure du câble.
Les zone renforcées en long et derrière le bossage doivent s'étendre transversalement sur une largeur que nous pouvons fixer au minimum de 5 bo ou 0.6 b(bo étant la demi-largeur du bossage, et b celle du hourdis), de part et d'autre de l'axe.
Les aciers longitudinaux derrière le bossage doivent se concentrer autour de l'axe de la pièce, où une rotule risque de se produire.
f) Si un bossage est proche des âmes latérales du caisson,

une armature transversale proche de la face supérieure du hourdis, doit reprendre la flexion qui se produit à l'encastrement.

g) Pour le cas de deux ancrages relativement proches, les aciers longitudinaux doivent s'étendre sur toute la zone comprise entre les deux bossages.

h) Faute d'une meilleure connaissance de la distribution de contraintes transversales dans la zone proche des discontuinités géométriques, dans le cas de plusieurs bossages groupés, une armature transversale doit être placée dans cette zone.

Sur les figures ci-après, nous résumons graphiquement certains de ces points.

— En ce qui concerne un possible prolongement de cette recherche, nous voulons signaler quelques remarques :

a) L'application de la méthode des éléments finis non linéaires au cas de bossages groupés nous semble interessante, étant donnée l'importance des redistributions d'efforts qui se produisent par suite de la fissuration du béton, et que pour des raisons de capacité d'ordinateur, nous n'avons pu étudier que pour le cas d'un seul bossage.

L'utilisation d'un moyen informatique plus performant permettrait aussi l'utilisation d'un élément de flexion conforme.

Il nous semble que les brusques variations des flexions qui existent dans un cas comme celui que nous étudions, ne peuvent pas être suivies de près par un élément non conforme.

Une confrontation avec des résultats expérimentaux doit aussi permettre de justifier les hypothèses adoptées lors de la modelisation du béton (fissuré ou non) et même , le cas échéant, de les améliorer.

b) Une meilleure connaissance de la distribution des contraintes à proximité des discontinuités géométriques et en particulier, de la zone juste derrière le bossage, ou des zones inter-bossages dans le cas de bossages groupés, ne

peut être envisagée que par l'intermédiaire de méthodes de calcul où l'on n'impose pas la conservation des sections planes.

c) L'étude du comportement des ouvrages réels nous semble nécessaire. Les essais expérimentaux ont donné une fissuration qui correspond en position et en nature à celle détectée dans les cas réels, mais les fissures sont fines, et n'ont atteint d'ouvertures comparables à celles qu'on trouve sur certains ponts, qu'à proximité de la rupture.

Or, le calcul théorique a montré que des déchargements dans le hourdis, pouvant représenter des effets différés ou thermiques, pourraient expliquer l'importance de ces dégâts. Il faudrait donc envisager le suivi du comportement du hourdis, à proximité des bossages, sur des ouvrages réels, afin de confronter cette hypothèse.

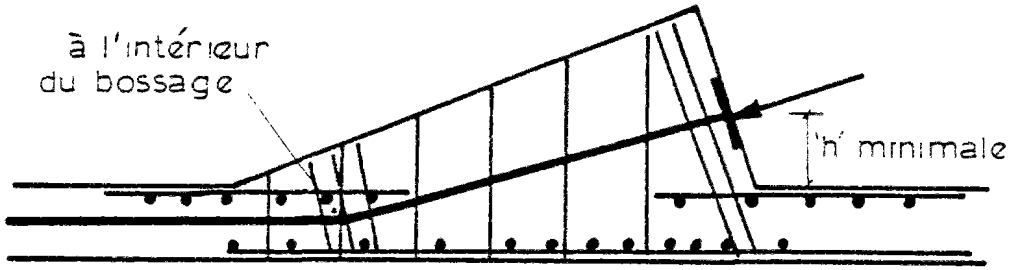


FIG. 6.1

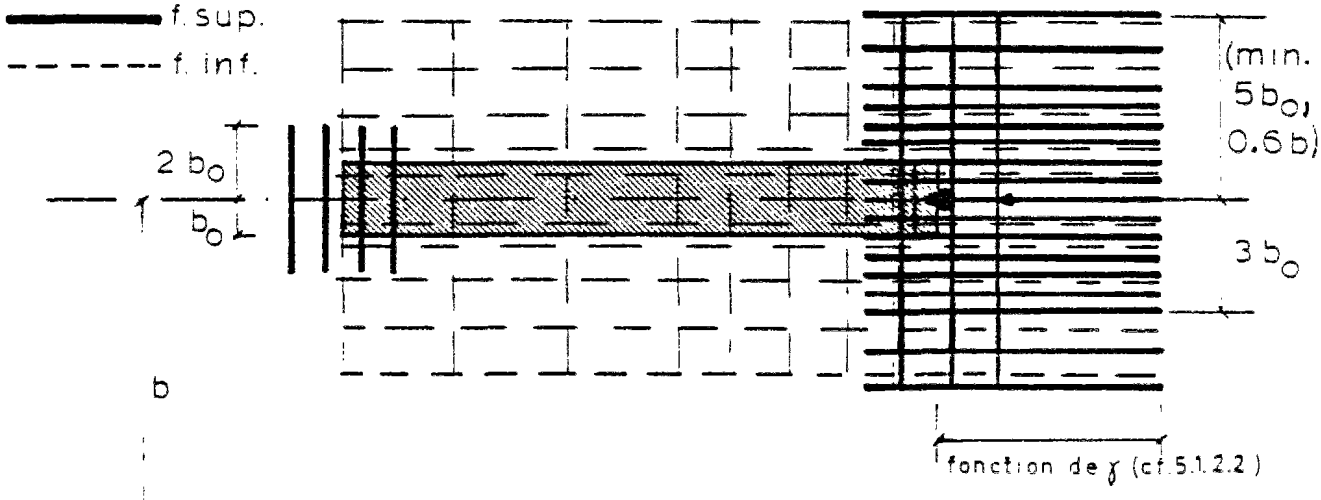


FIG. 6.2

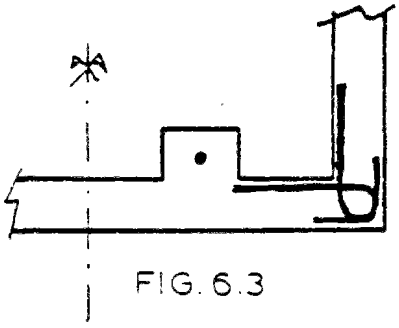
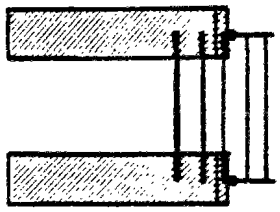
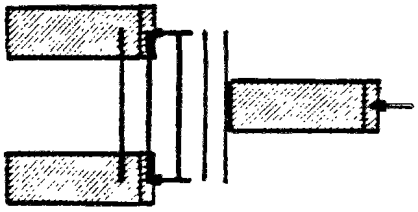


FIG. 6.3

FIG 6.4





REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Y.GUYON - "Constructions en béton précontraint". Cours du CHEBAP, Tome 2, Eyrolles, Paris, 1968.

2. INSTRUCTION PROVISOIRE POUR LE CALCUL DES OUVRAGES EN BETON PRECONTRAINT. Circulaire n° 73-153 du 13 Août 1973. Fascicule n° 74-64 du Bulletin Officiel, Paris.

3. W. SCHLEEH - "Ein einfaches Verfahren zur Lösung von Scheibenaufgaben" (Méthode simple pour résoudre les problèmes relatifs aux plaques). Beton und Stahlbetonbau. Heft 3,4 et 5.1964.

4. W. SCHLEEH - "Spanngliedverankerungen im Innern hoher Träger" (Ancrage des câbles de précontrainte à l'intérieur des poutres hautes). Beton und Stahlbetonbau. Heft 2. 1974

5. J. EIBL et G. IVANYI - "Innenverankerungen im Spannbetonbau" (Les ancrages internes en béton précontraint). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 223, Berlin, 1973.

6. B.Y. OULITSKI, O.I. VALOUYVA et D.N. POLIADOV - "Rastchyét Myéstnikh Napryagénii vo Khonstraukhtsiyakh Mostov". (Calcul des efforts locaux dans les ponts de béton précontraint). Moscou, 1974.

7. LY KIM TY - "Effets des forces de précontrainte concentrées dans les poutres caissons". Thèse pour l'obtention du titre de Docteur-Ingénieur, présentée à l'Université de PARIS VI. Décembre 1976.

8. J. BRUNEAU - "Etude de l'ancrage d'un câble de précontrainte par bossage". La Technique Française du Béton Précontraint. Association Française du Béton. 8ème Congrès International de la Précontrainte. FIP, Londres, 1978.

9. M. KAVYRCHINE, J. TRINH, R. LAPLACE "Etude de l'ancrage des câbles de précontrainte dans le hourdis". Compte rendu du S E S des essais HO, Saint Rémy lès Chevreuse (France). 1976.

10. S.P. TIMOSHENKO, J.N. GOODIER - "Theory of elasticity" Mc. Graw et Hill. 1970.

11. S. TIMOSHENKO, S. WOINOWSKY-KRIEGER - "Teoria de placas y laminas". Ediciones Urmo. Bilbao. 1970.

12. G. PICKETT - "Application of the Fourier Method to the Solution of certain boundary problems in the theory of elasticity". Journal of Aplied Mechanics . Septembre 1944.

13. F.G. LEHMAN - "Simultaneous Equations Solved by Over Relaxation". 2nd. Conference on Electronic Computation. American Society of Civil Engineers. September.8,9.1960.

14. D. NGO et A.C. SCORDELIS - "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams". ACI Journal. Mars 1967.

15. O.C. ZIENKIEWICZ - "La méthode des éléments finis" Ediscience. Paris 1973.

16. O.C. ZIENKIEWICZ, S. VALLIAPAN et I.P. KING - "Stress Analysis of Rock as a 'No Tension' Material". Geotechnique V 18. Mars 1968.

17. O.C. ZIENKIEWICZ, S. VALLIAPAN et I.P. KING - "Elasto-plastic Solutions of Engineering Problems - 'Initial Stress'- Finite Element Approach". International Journal for Numerical Methods in Engineering. Janvier 1969.

18. H. KUPFER, H.K. HILSDORF et H. RUSCH - "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses". ACI Journal. Août 1969.

19. H. KUPFER - "Das Verhalten der Betons unter mehrachsiger Kurzzeit belastung unter besonderer Berücksichtigung der Zweiachsigen Beanspruchung" (Comportement du béton sous charge pluriaxiale de courte durée : en particulier sous charge biaxiale) Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 229, Berlin 1973.

20. L.J.M NELISSEN "Biaxial testing of normal concrete" Heron. V18.1972.nr1.

21. T.C.Y. LIU, A.H. NILSON et F.O. SLATE. - "Stress-strain Response and fracture of concrete in uniaxial and biaxial compression". ACI Journal. Mai 1972.

22. O. BUYUKOZTURK, A.H. NILSON et F.O. SLATE - "Stress-strain Response and Fracture of a Concrete Model in Biaxial Loading". ACI Journal. Août 1971.

23. N.J. CARINO et F.O. SLATE - "Limiting Tensile Strain Criterion for Failure of Concrete". ACI Journal. Mars 1976.

24. M.E. TASUJI, F.O. SLATE et A.H. NILSON - "Stress Strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Loading". ACI Journal. Juillet 1978.

25. T.C.Y. LIU, A.H. NILSON et F.O. SLATE - "Biaxial Stress Strain Relations for the Concrete". Journal of the Structural Division. ASCE. Mai 1972.

26. L. CEDOLIN et S. Dei POLI - "Finite Element Non Linear Analysis of Reinforced Concrete Bidimensional Structures". Technical Report nr.40. ISTC. Politecnico di Milano. Dep of Structural Engineering. 1974.

27. L.P. SAENZ - "Equation for the Stress Strain Curve of Concrete". ACI Journal. Septembre 1974.

28. S.G. LEKHNITSKII - "Theory of elasticity of an anisotropic elastic body". Holden-Day Inc. San Francisco 1963.

29. L. CEDOLIN et S. Dei POLI - "Finite Element Studies of Shear Critical R/C Beams". Journal of Engineering Mechanics Division ASCE. Juin 1977.

30. E.L. WILSON - "Finite Element analysis of two dimensional Structures". University of California. 1963.

31. G.P. BAZELEY, Y.K. CHEUNG, B.M. IRONS et O.C. ZIENKIEWICZ - "Triangular elements in plate bending - conforming and non conforming solutions". Matrix Methods in Structural Mechanics. Proceedings of the Conference held at Wright Patterson Air Force base. Ohio. Octobre 1965.

32. Y.K. CHEUNG, I.P. KING, et O.C. ZIENKIEWICZ - "Slab bridges with arbitrary shape and support conditions : a general method of analysis based on finite elements". Proceedings Institute of Civil Engineering. V 40. pg. 9-36. 1968.

33. C. AVRAM - "Béton non armé et béton faiblement armé". Rapport justificatif et explicatif à l'ADDITIF aux "Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton (1970)"du Comité Européen du Béton. 1971.

NS 20038 (4)
t.2

THESE de DOCTEUR-INGENIEUR

présentée

à l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

par

Francisco MILLANES MATO

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR

Sujet de la thèse : Ancrages par bossage dans les hourdis de ponts.

II.- Annexes: Etude bibliographique et listings des programmes

SOUTENUE LE 11 JUIN 1979 DEVANT LE JURY COMPOSE DE:

M. Jean SALENÇON	Président
MM. Robert CHAUSSIN	Examinateurs
Michel FREMOND	
Michel KAVYRCHINE	
Jean LEMAITRE	
Jacques TRINH	

21

21 Y

E.N.P.C.
INV03796

THESE de DOCTEUR-INGENIEUR

présentée

à l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

par

Francisco MILLANES MATO

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR

Sujet de la thèse : Ancrages par bossage dans les hourdis de ponts.

II.- Annexes:Etude bibliographique et listings des programmes

SOUTENUE LE 11 JUIN 1979 DEVANT LE JURY COMPOSE DE:

M.	Jean SALENÇON	Président
MM.	Robert CHAUSSIN	Examinateurs
	Michel FREMOND	
	Michel KAVYRCHINE	
	Jean LEMAITRE	
	Jacques TRINH	

TABLE DE MATIERES

Pages

ANNEXE A.- Résumé des recherches faites jusqu'à présent, concernant le calcul des structures en béton armé au moyen de la méthode des éléments finis 1

1.-Recherches concernant le comportement du béton sous charges biaxiales 1

1.1.-Aperçu des premières recherches 1

1.2.-Les plus récentes recherches 5

2.-Etudes concernant l'application de la méthode des éléments finis au calcul des structures en béton armé 13

2.1.-Etudes planes 13

2.2.-Etudes incorporant la flexion 28

3.-Références bibliographiques 32

ANNEXE B.- Programme 'CPC' 39

ANNEXE C.- Programme 'ELF' 88

ANNEXE D.- Programme 'FLF' 137

ANNEXE A

Résumé des recherches faites jusqu'à présent, concernant le calcul des structures en béton armé au moyen de la méthode des éléments finis.

1. - Recherches concernant le comportement du béton sous charges biaxiales.

Le choix du modèle le mieux approprié pour reproduire le comportement non-linéaire du béton soumis à des états biaxiaux de sollicitation, ainsi que les critères de rupture et de fissuration, est un point important du traitement de structures en béton armé par éléments finis.

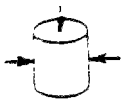
Bien que le comportement du béton sous une sollicitation uniaxiale soit bien connu depuis longtemps, et que de nombreuses équations, basées sur des résultats expérimentaux, aient été proposées (POPOVICS (ref. 34) a fait un recueil, comportant 35 références bibliographiques), les recherches portant sur des sollicitations biaxiales, n'ont abouti à des résultats suffisament complets que récemment.

1.1. - Aperçu des premières recherches. -

— En fonction de la façon dont elles ont essayé de reproduire un état biaxial de sollicitations sur l'éprouvette, nous pouvons les classer comme suit :

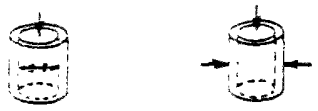
a) Essais sur des cylindres solides .-

Les éprouvettes étaient introduites dans un cylindre de compression. Elles étaient chargées radialement au moyen d'une pression hydrotatique uniforme ($\sigma_1 = \sigma_2$).

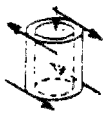


Le dispositif permettait aussi la réalisation d'essais triaxiaux, moyennant une charge axiale appliquée aux bouts de la pièce ($\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$), par l'intermédiaire de plateaux de compression. La possibilité

de pénétration du liquide en pression à travers les pores du béton obligeait à recouvrir l'éprouvette d'une membranne protectrice.
Il était aussi nécessaire d'assurer la déformation axiale du cylindre sans qu'elle ne soit gênée, de façon à y reproduire un vrai état biaxial de sollicitations.
De tels essais ont été réalisés par RICHART et autres (réf. 35) et par BELLAMY (réf. 36), lesquels n'ont abouti qu'à constater une appréciable augmentation de la résistance du béton par rapport aux essais uniaxiaux.
b) Essais sur des cylindres creux soumis à une compression (ou traction) axiale, combinée avec une pression hydrostatique interne ou externe.-
De tels essais ont été réalisés par BELLAMY (ref. 36), dans le domaine C-C, et par Mc HENRY et KARNI (ref. 37), en C-T.



La première difficulté réside dans le fait que l'état de sollicitations sur la face du cylindre où la pression hydrostatique est appliquée, est triaxial (σ_z, σ_θ, σ_r).Seulement sur la face opposée, où σ_r s'annule, l'état de contrainte est biaxial. En outre, les contraintes σ_θ varient sur l'épaisseur du cylindre, au moins en phase élastique, si le diamètre n'est pas suffisamment grand par rapport à l'épaisseur. La plupart des auteurs ont cependant supposé une distribution uniforme des σ_θ .
Les courbes de rupture sont rapportées à la fig. 1. Nous y constatons que les résultats de MC.HENRY concordent assez bien avec ceux d'autres auteurs. Par contre, BELLAMY a obtenu des contraintes de rupture en bicompression trop élevées.
c) Essais sur des cylindres creux soumis à une compression (ou traction) axiale, combinée avec un moment de torsion.-



Cette méthode rend possible toutes les combinaisons de sollicitations dans la zone C-T. Il suffit de faire varier le rapport entre la sollicitation axiale et la torsion. Plusieurs auteurs l'ont utilisée : BRESLER et PISTER (ref. 38 et 39), GOODE et HELMY (ref. 40) et JOHNSON et LOWE (ref. 41). On doit vérifier certaines conditions pour que les résultats soient fiables :

1. - l'épaisseur de la pièce doit être petit par rapport au diamètre, ce qui rend les contraintes σ_θ à peu près uniformes sur l'épaisseur du parois ;
2. - la longueur du cylindre doit être suffisament grande, de façon à ce qu'au milieu de la pièce, les perturbations entraînées par les plateaux de chargement soient négligeables ;
3. - le mécanisme d'application de la charge doit permettre, d'une part les déformations longitudinales de la pièce sans les gêner et, d'autre part la connaissance des pertes du moment de torsion appliqué, dues aux frictions et aux glissements dans le mécanisme.

d) Essais sur des cubes et des plaques.-

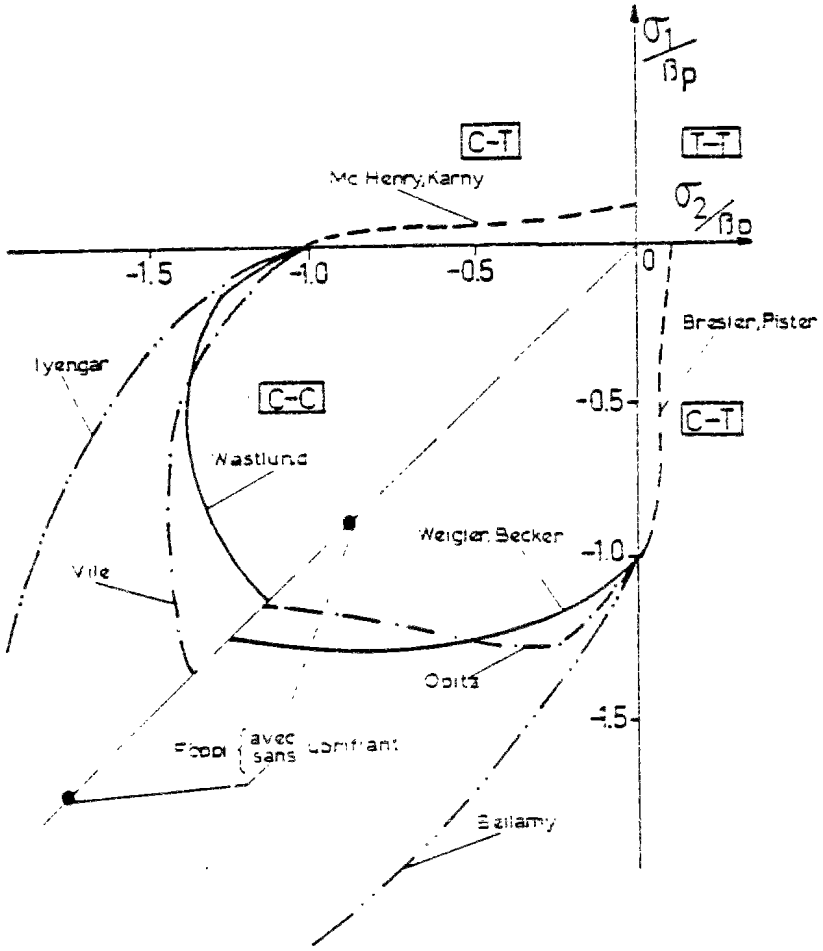
De nombreuses recherches sur ce type d'éprouvettes ont été réalisées : FÖPPL (ref. 42), WÄSTLUND (ref. 43), GLOMB (réf. 44), WEIGLER et BECKER (réf. 45), IYENGAR et autres (ref. 46), ROBINSON (réf. 47), VILE (réf. 48) SCHRÖDER et OPITZ (réf. 49), MILLS et ZIMMERMAN (ref. 50).

Le principal problème de ce type d'essais réside dans l'influence du mode d'introduction de la charge sur l'état de contraintes réel qui se crée dans l'éprouvette, qui peut être fort loin de celui qui était prévu. Par suite du frottement entre le béton et les plateaux de chargement, des contraintes de cisaillement apparaissent sur les bords de la plaque, qui sont gênées dans leurs déformations. Cet effet de confinement entraîne une apparente augmentation de la résistance de l'éprouvette. FÖPPL, WÄSTLUND et GLOMB ont essayé

d'éliminer cet effet par l'intermédiaire d'un lubricant, mais leurs résultats montrent une énorme influence du lubricant sur les résultats des essais, pouvant même agir dans le sens contraire (réduction apparente de la résistance). En outre, ces forces de frottement transmettent directement une partie des forces introduites en une direction, aux plateaux de chargement de l'autre direction. De ce fait, la charge effective dans l'éprouvette est toujours plus petite que celle appliquée.

— Toutes ces recherches ont apporté une série de résultats d'une énorme dispersion, dont une partie est donnée dans la fig.1. D'une part, les essais portaient sur des corps d'épreuve de différentes formes et grandeurs et, d'autre part le problème essentiel réside dans l'obtention d'un état de contraintes dans l'éprouvette qui soit uniforme, parfaitement défini, et non variable avec les déformations qui se produisent durant l'essai, ce qui n'était pas accompli dans la plupart des cas. La plupart des études ne fournissait aucune donnée concernant les lois de comportement $\sigma - \varepsilon$ jusqu'à la rupture, Ils se limitaient à étudier tout au plus les valeurs ultimes. Elles ont néanmoins confirmé une augmentation de la résistance dans le domaine C-C et une diminution en C-T, par rapport aux valeurs uniaxiales, l'évaluation de ces variations étant impossible du fait de la dispersion des résultats.

Une autre constatation intéressante est celle de la non-influence importante du mode de chargement sur les contraintes ultimes obtenues. Par contre, les déformations ultimes, et par conséquent les lois $\sigma - \varepsilon$, se sont avérées très influençables.



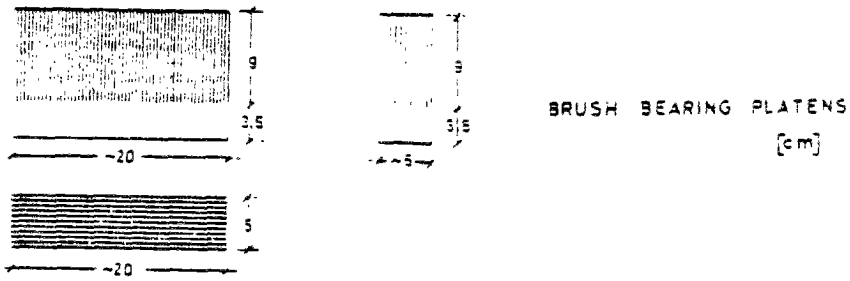
β_p : résistance du béton sur prisme.

FIG. 1

1.2. - Les plus récentes recherches.-

— En 1965, HILSDORF (ref. 51) publiait une étude où, à partir d'une analyse critique des recherches antérieures, il conclut que la forme des éprouvettes la plus adéquate était celle des plaques carrées minces, soumises à des sollicitations dans leur plan. De façon à éviter les contraintes transversales entre les plateaux de chargement et les bords des éprouvettes, la charge devait être appliquée par l'intermédiaire des "plaques à brosse" (fig.2) qui consistent en un grand nombre de tiges d'acier individuelles et assemblées de façon à constituer un paquet. Elles doivent être suffisamment souples

pour pouvoir suivre, en tout point, les déformations de la surface de l'éprouvette sans y entraîner des contraintes transversales. En même temps, elles doivent avoir une résistance au flambement suffisante. Grâce à l'emploi des colles synthétiques, des efforts de traction peuvent aussi être appliqués.



Loading equipment for biaxial loading without restraint of the lateral deformations

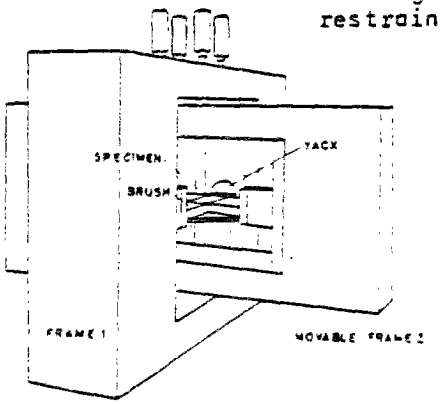


FIG. 2

— De nombreux auteurs ont effectué des recherches en utilisant une telle méthode d'application de la charge :

a) Les premiers travaux ont été publiés par KUPFER en 1969 (réf. 18 et 19), sur des éprouvettes de dimensions 20 cm x 20 cm x 5 cm. Ils portaient sur toutes les combinaisons biaxiales possibles, C-C, C-T, et T-T, et sur trois bétons de qualité différente ($\beta_p \simeq$ 190, 315 et 590 kg/cm2).

b) STEGBAUER et LINSE (réf. 52) ont réalisé des essais sur des éprouvettes des mêmes dimensions que celles de KUPFER, mais avec différents matériaux : béton ($\beta_p \simeq$ 200, 300 et 600 kg/cm2), béton cellulaire ($\beta_p \simeq$ 40 kg/cm2), ciment ($\beta_p \simeq$ 300 kg/cm2) et plâtre ($\beta_p \simeq$ 130 kg/cm2).

c) NELISSEN (réf. 20), en travaillant sur des éprouvettes de 18 x 18 x 13 cm, a essayé deux types de béton ($\beta_p \simeq$ 250 et 350 kg/cm2). Il a aussi étudié l'influence de divers facteurs (type de béton, vitesse et façon d'application de la charge, chemin de chargement suivi), sur les valeurs des contraintes et des déformations ultimes.

d) LIU, NILSON et SLATE (réf. 21) ont travaillé dans le domaine de compression uni et biaxiale sur deux types différents d'éprouvettes, de dimensions 12.7 x 12.7 x 1.27 cm : en béton réel (β_p entre 210 et 350 kg/cm2), et sur un modèle idéal composé par un mortier, dans lequel on imbibait des disques d'agrégat de trois grandeurs différentes (fig.3). Des photographies par rayons-X ont permis de suivre la formation et la propagation des microfissures au fur et à mesure du chargement. Les auteurs ont constaté une étroite correlation entre le comportement non linéaire du béton et le processus de microfissuration à l'intérieur du matériau.

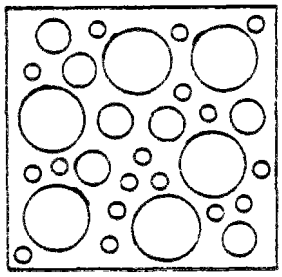


FIG.3

e) BUYUKOZTURK et NILSON (réf. 22) ont effectué une recherche expérimentale similaire sur le modèle idéal de la fig. 4, accompagnée d'une étude analytique au moyen d'un programme d'éléments finis non linéaires. Cette recherche, limitée aux sollicitations de bicompression, a été ultérieurement étendue aux domaines de compression-traction et de bitraction par CARINO et SLATE (réf. 23).

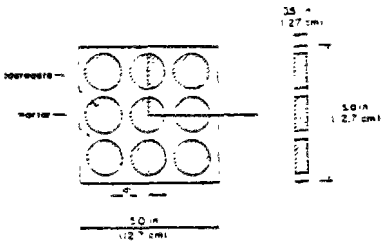


FIG.4

f) TASUJI, NILSON et SLATE (réf. 24) ont publié très récemment le rapport d'une recherche, continuation de celle de d), qui, portant sur un béton de $\beta_p \simeq$ 340 kg/cm2, comportait toutes les combinatioas possibles de sollicita-

tions (C-C, C-T et T-T).
Excepté une série d'essais réalisée par NELISSEN, toutes ces recherches ont été effectuées avec une augmentation proportionnelle de la charge (σ_I/σ_{II} = cte. le long de l'essai.)

— Les résultats obtenus dans les recherches précédentes concordent, en général, assez bien. Ensuite, nous allons présenter ceux qui concernent le plus, l'étude des structures en béton par éléments finis.

A) Contraintes ultimes.-

L'accord sur ce point entre les différentes recherches est assez bon (fig.5):

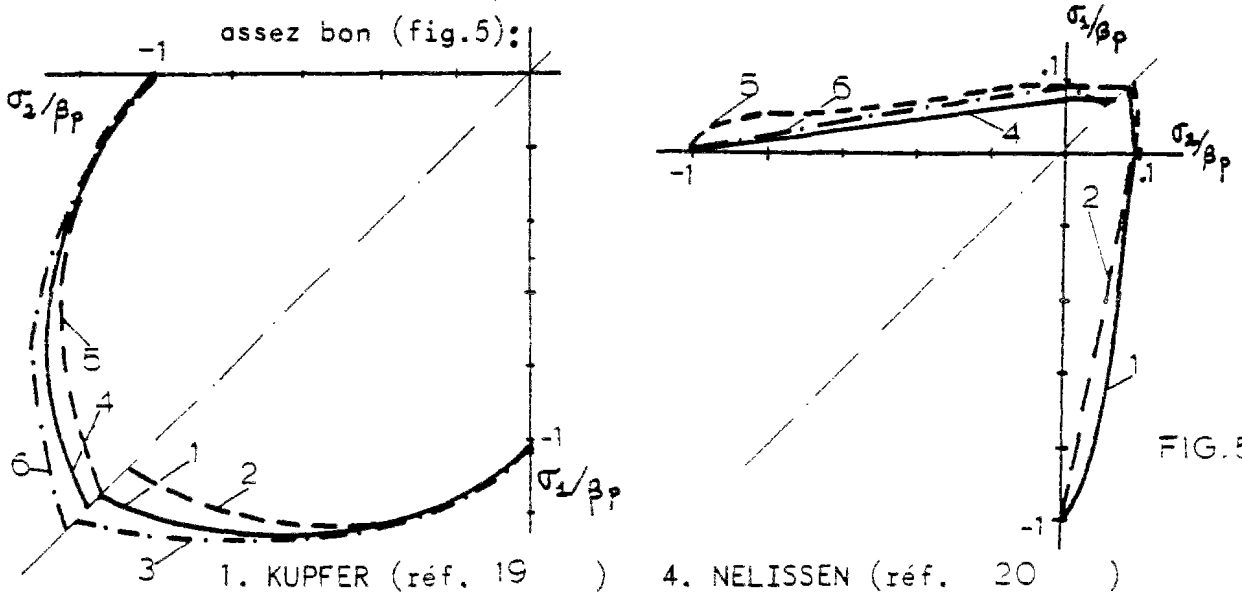


FIG.5

1. KUPFER (réf. 19)
2. TASUJI (réf. 24)
3. LIU (réf. 21)
4. NELISSEN (réf. 20)
5. STEGBAUER (réf. 52)
6. BUYUKOZTURK (réf. 22) (sur modèle).

Les conclusions tirées par les différents auteurs peuvent se résumer tel que suit :

— La résistance du béton en bicompression est plus grande qu'en compression uniaxiale. Cette augmentation est sensiblement indépendante de la qualité du béton.
Dans les domaines C-T et T-T, ces différences s'accentuent, du fait que la résistance à la traction uniaxiale du béton

(rapportée à celle du prisme β_p), diminue quand la qualité du béton augmente.

Pour un béton donné, dans le domaine C-T la résistance diminue quand le rapport traction/compression augmente. De très faibles tractions suffisent pour entraîner de fortes réductions des compressions ultimes par rapport aux valeurs uniaxiales.

Dans le domaine T-T, la résistance ultime est très proche de celle uniaxiale. Ce résultat a été contredit par TASUJI, qui a obtenu une faible augmentation de la résistance en traction biaxiale, avec un maximum de 10 % environ pour un rapport de contraintes $\sigma_I / \sigma_{II} = 2$. En tout cas, cette augmentation n'est pas importante.

— NELISSEN a trouvé que les différentes façons d'application de la charge n'ont pas une influence significative sur les contraintes ultimes.

— Les modules de déformation tangent (E t) obtenus dans les essais de compression et de traction uniaxiaux ne diffèrent pas beaucoup. Par contre, on a constaté une diminution du 10 % environ dans le module de Poisson en traction uniaxiale par rapport à celui en compression uniaxiale.

— Le tableau suivante résume quelques résultats obtenus par différents auteurs :

	KUPFER (réf. 19)	NELISSEN (réf. 20)	STEGBAUER (réf. 52)	LIU (réf. 21)	TASUJI (réf. 24)
$\sigma_{ult.}$ en compression biaxiale	1.16 β_p	1.20 β_p	1.15 β_p	1.21 β_p	1.06 β_p
$\sigma_{ult.}$ maximale en bicompression (pour $\sigma_I / \sigma_{II} = 0.5$)	1.27 β_p	1.30 β_p	1.25 β_p	1.25 β_p	1.22 β_p
σ_{ult} en traction uniaxiale ($\beta_p \simeq 300$ b)	0.09 β_p	0.055 β_p	0.09 β_p		0.09 β_p
$\sigma_{ult.}$ en traction uniaxiale en fonction de β_p	$0.64 \sqrt[3]{\beta_p^2}$				$1.59 \sqrt{\beta_p}$

(β_p = résistance sur prisme du béton)

B) Déformations ultimes.-

Dans la fig. 6 nous présentons les déformations à la rupture ε_{1u}, ε_{2u}, ε_{3u}, obtenues par KUPFER, pour un béton de $\beta_p \simeq 300$ bars, en fonction de $\gamma = \text{arc.tan}\, \sigma_I / \sigma_{II}$

Nous y avons aussi rapporté les valeurs obtenues par les autres auteurs, avec des bétons de qualité similaire.

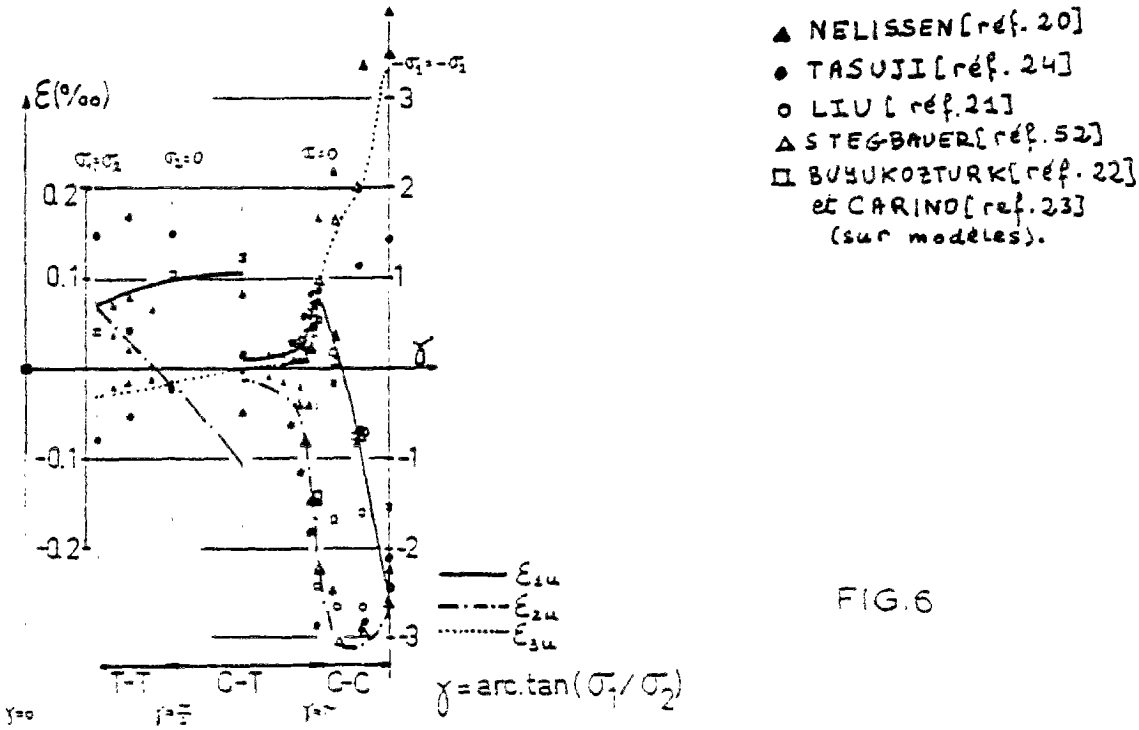


FIG.6

— Ici, la divergence entre les résultats des différents essais est plus marquée que pour les contraintes ultimes. En effet, NELISSEN a constaté que les déformations à la rupture étaient très sensibles à différents facteurs (cf. figure 3.8 du chapitre 3) :

a) La qualité du béton, les bétons de plus grande résistance étant moins déformables dans le domaine de la compression et plus en traction biaxiale ;

b) La taille et la proportion des agregats ;

c) La vitesse d'application de la charge. Plus elle est grande, plus les déformations à la rupture diminuent ;

d) La façon dont l'augmentation de la charge est faite au cours de l'essai.

e) Le chemin de chargement suivi (proportionnel ou non, par exemple).

Ces variations dans les valeurs des déformations ultimes influencent, évidemment, les diagrammes $\sigma - \varepsilon$ du béton jusqu'à la rupture.

— On peut, en tout cas, tirer quelques remarques :

a) A un stade quelconque du chargement, le béton en compression biaxiale présente une déformation dans le sens de la plus forte compression, nettement plus faible qu'en compression uniaxiale . L'effet de Poisson ne suffit pas à expliquer toute cette diminution. Des observations de microfissures (réf. 21) indiquent que cela est dû au confinement du potentiel de microfissuration, par suite de la présence d'une autre compression dans la direction transversale.

b) La valeur de la plus grande déformation de traction à la rupture n'est pas constante, mais augmente en fonction du degré de compression (fig 7). Cela semble montrer que le béton résiste mieux aux déformations de traction indirectes (dues à l'effet de Poisson) qu'à celles qui sont directes (dues à l'application des contraintes de traction).

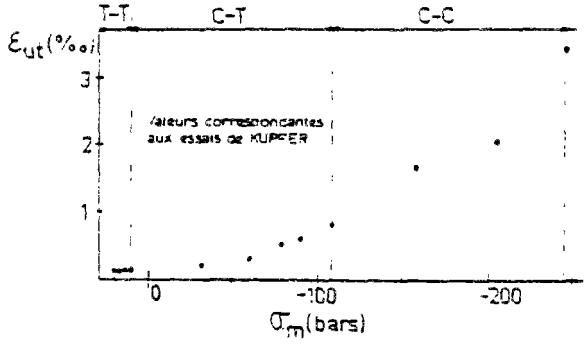


FIG.7

σ_m : $(\sigma_{I,u} + \sigma_{II,u})/3$, à la rupture.

ε_{ut} : déformation maximale de traction à la rupture.

c) Formes de rupture .-

— La plupart des essais concordent sur ce point, y compris ceux qui ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques cubiques, etc...

La forme de rupture n'est fonction ni de la façon d'application de la charge ni de la qualité du béton, pouvant être considérée comme fonction du rapport de contraintes uniquement. Dans tous les essais uni et biaxiaux, la rupture est obtenue par fissuration, suivant des plans normaux à la direction de

la plus grande déformation de traction. Ce qui a conduit plusieurs auteurs (ref. 23 et 24) à proposer, pour toutes les combinaisons biaxiales de contraintes, un critère de rupture du béton par décohésion, quand la valeur de la plus grande déformation de traction dépasse une valeur limite, qui ne serait pas constante, mais fonction du rapport de contraintes.

— Sous une sollicitation de traction uniaxiale ou biaxiale, il se produit une rupture brusque accompagnée de l'apparition d'une seule fissure suivant le plan normal à la direction de la plus grande contrainte de traction. En traction biaxiale, aucune direction n'est préférentielle, la fissure étant toujours normale à la surface non chargée.

En bicompression, on détecte une fissuration suivant des plans à peu près parallèles à la surface libre de l'éprouvette. Quand une des compressions est nettement plus grande que l'autre, de nouvelles fissures suivant de plans normaux à la plus petite compression apparaissent, en découpant de petites colonnes parallèles à la compression la plus forte.

En compression-traction, la rupture est celle de bitraction sauf pour de faibles valeurs des tractions par rapports aux compressions, pour lesquelles de diverses fissures parallèles sont observées à la rupture.

Dans la fig.8, nous montrons un schéma des différentes formes de rupture, avec les valeurs proposées par les différentes auteurs, pour délimiter les zones où les ruptures sont les *celles* des tractions ou des compressions, ainsi que celle de transition entre les deux.

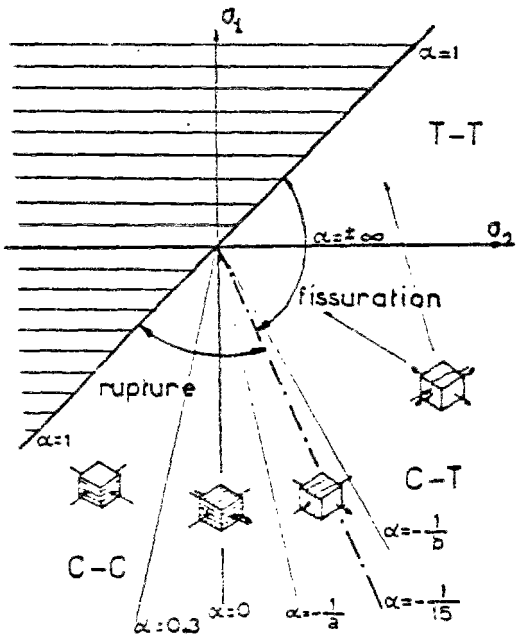


FIG.8

$$\alpha = \frac{1}{\beta} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$$

	a	b
ISEMBERG (Réf.41)	25	11
Mc.HENRY (Réf.37)	31	13
KUPFER (Réf.19)	15	15
STEGBAUER (Réf.52)	13	13
NELISSEN (Réf.20)	100	25 à 30
TASUJI (Réf.24)	20	20

2.- Etudes concernant l'application de la méthode des éléments finis au calcul des structures en béton armé

— La première application de la méthode des éléments finis au calcul des structures en béton armé, date de 1967 (Réf. 14). Depuis, de nombreuses publications sont apparues. La récapitulation qui va suivre est destinée à donner un tour d'horizon des recherches faites jusqu'à présent dans ce domaine.

2.1.- Etudes planes

— Le développement d'un modèle analytique pour les structures en béton armé, en utilisant la méthode des éléments finis, comporte l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices concernant la modélisation de trois phénomènes :

a) la fissuration du béton;

b) les lois de comportement et les critères de rupture du béton soumis à des sollicitations biaxiales;

c) la liaison entre le béton et les armatures.

Dans ce qui suit, nous allons grouper les travaux des différents auteurs en fonction du traitement qu'ils ont donné à ces trois problèmes.

I - Fissuration du béton

Les premières recherches ont abordé le problème d'une façon assez sommaire. NGO et SCORDELIS (Réf. 14), ont étudié la flexion de poutres appuyées en béton armé, dans lesquelles les fissures étaient préalablement définies en position et longueur. Les fissures étaient obtenues par séparation des éléments de béton aux deux côtés de la fissure. Ce qui se faisait en assignant un point nodal différent à chaque côté. Physiquement, les deux points nodaux sont placés, au début du chargement, au même point de l'espace.

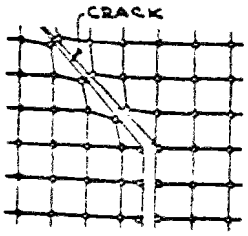
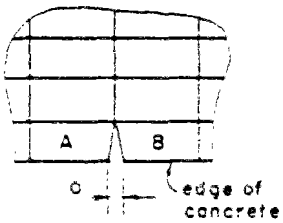
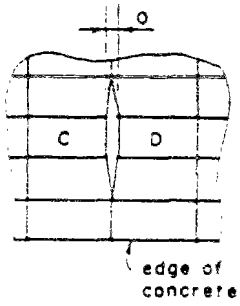


Fig.9

NILSON (Réf. 53), a appliqué incrémentiellement la charge sur la structure jusqu'à ce que les tractions principales dépassaient la résistance à la traction du béton à un ou plusieurs endroits. Si la moyenne des tractions en deux éléments adjacents dépassait cette valeur, une fissure était supposée apparaître entre eux, le long de leur bord commun. Cela était fait en supprimant la liaison entre ces deux éléments sur leurs noeuds communs (fig.10), ce qui exigeait une nouvelle définition de la maille. Puis le chargement était arrêté et réappliqué dès le début sur la structure que l'on venait de redéfinir.



(a) Exterior Crack



(b) Interior Crack

Fig.10

LOOV (Réf.55), a proposé une méthode assez sophistiquée pour essayer de mieux suivre l'apparition et la propagation des fissures dans le béton, indépendamment de la forme et la grandeur des éléments. Une fois que les tractions dans un élément dépassaient la résistance du béton, il estimait approximativement le point à l'intérieur de l'élément où la fissure apparaissait, ainsi que sa direction. L'élément devenait alors décomposé en trois triangles et quatre nouveaux points nodaux devaient y être ajoutés (fig.11-a). Puis, il considérait que ce sont les efforts au voisinage du bout de la fissure qui gouvernent la propagation de celle-ci, et décomposait, temporairement, l'élément adjacent en plusieurs sous-éléments, dont un de très petites dimensions ('sensor' élément de la fig.11-b) qui devrait déterminer la direction de la propagation de la fissure sur ce nouvel élément.
Les fissures étaient donc représentées par une série de lignes droites qui se terminaient sur les bords des éléments.

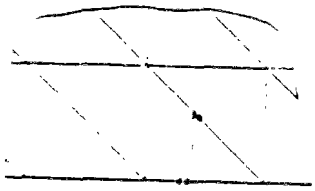


Fig. 11-a

Permanent subdivision of a cracked element

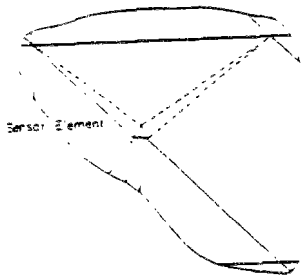


Fig.11-b

Temporary subdivision of an element at the end of a crack.

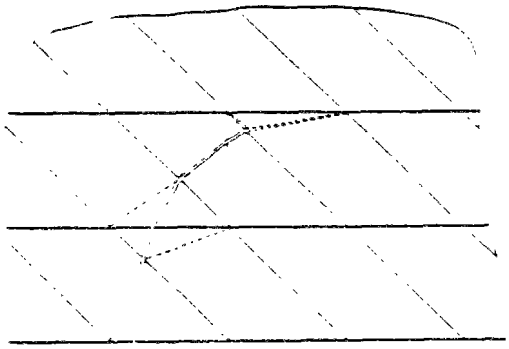


Fig.11-c

A crack extending through several elements.

De telles méthodes entraînent une augmentation considérable du temps de calcul, sans pour autant assurer une reproduction exacte du processus de fissuration qui, ayant une composante aléatoire importante du fait du caractère complexe des propriétés du béton, ne justifie pas une approche si précise.

— La plupart des auteurs ont par conséquent utilisé une autre représentation du mécanisme de la fissuration. Celle-ci consiste à reproduire à l' intérieur des éléments fissurés, le mécanisme qui résiste aux nouvelles augmentations de la charge. A partir du moment où les contraintes de traction dans un élément quelconque dépassent la résistance du béton, cet élément devient fissuré en direction normale à la plus grande contrainte (ou déformation) de traction et ne supporte aucune nouvelle augmentation des contraintes en direction normale aux fissures. Evidemment, une telle méthode ne reproduit que le "comportement moyen" de la zone fissurée et exige une petite taille des éléments de cette zone.

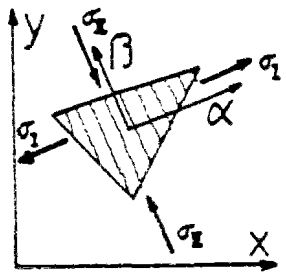


Fig.12

La matrice de raideur tangente d'un élément fissuré, rapportée aux axes α et β est de la forme

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_I \\ d\sigma_{II} \\ d\tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_I \\ d\varepsilon_{II} \\ d\gamma \end{Bmatrix}$$

E'_t étant le module d'élasticité tangent du béton sous une sollicitation uniaxiale.

La plupart des études supposent que tout l'élément devient fissuré, une fois que les contraintes de traction deviennent inadmissibles. Nous voulons cependant noter l'existence d'une publication de COLVILLE et ABBASI (Réf. 56), où ils

travaillent avec des éléments rectangulaires à champ de déformation variable, lesquels peuvent être fissurés sur une partie seulement de leur surface (fig.13).

— SCHNOBRICH et autres (Réf. 57) ont, pour la première fois, montré le besoin d'introduire, dans le modèle du béton fissuré, une certaine rigidité vis-à-vis des déformations tangentes. Autrement, les auteurs ont constaté une déviation dans les directions des fissures théoriques par rapport à celles des essais. Cette transmission des efforts tangents à travers les fissures permet donc de tenir compte, quoique de façon approchée, des phénomènes d'engrènement du béton des deux côtés de la fissure, et de l'effet-goujon dans les aciers.

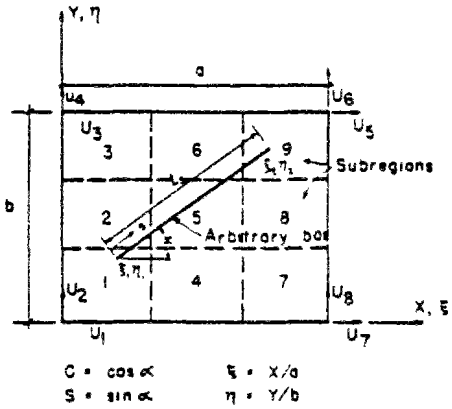


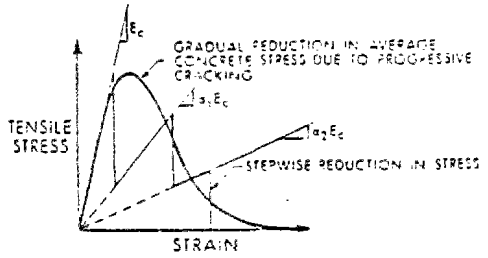
Fig. 13

Cela a été introduit moyennant le coefficient 'A' de la matrice du béton fissuré : $d\tau = A\, d\gamma$. La valeur de 'A' peut être exprimée en fonction du coefficient G de raideur transversale du béton non fissuré : $A = \beta G$, où β prend une valeur entre 0 et 1. La valeur de β est fonction de l'ampleur des fissures et, certainement, du type de fissuration de chaque cas particulier. Les différents auteurs ont proposé des valeurs qui leur ont permis de mieux approcher les résultats expérimentaux qu'ils ont étudiés. En voici quelques-uns :

SCANLON et MURRAY (Réf. 58) : $\beta = 1.$;
YUZUGULLU et SCHNOBRICH (Réf. 59) $\beta = 0{,}125$ à $0{,}250$;
SUIDAN et SCHNOBRICH (Réf.60) : $\beta = 0{,}5$;
CEDOLIN et POLI (Réf. 29), ont proposé une valeur de β qui varie entre 0,24 et 0., en diminuant quand l'amplitude des fissures augmente.
Dans les cas étudiés par HAND et autres (Réf. 61), et par LIN et SCORDELIS (Réf. 62) le modèle s'est avéré presque insensible à la valeur de β , pourvu qu'elle soit supérieure à 0.2.

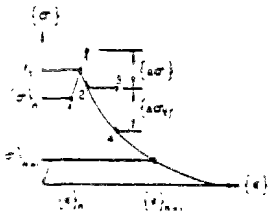
—ISEMBERG et ADHAM (Réf. 63), SCANLON et MURRAY (Réf. 58), SUIDAN et SCHNOBRICH (Réf. 60) et LIN et SCORDELIS (Réf. 62), ont proposé des modèles où l'on tient compte de la participation du béton tendu entre fissures, afin de représenter convenablement la déformabilité de l'élément en phase fissurée.

Excepté SCALON, qui approchait la dégradation progressive de la rigidité de l'élément, en réduisant le module d'élasticité sécante en fonction du niveau de déformation atteint dans la direction normale aux fissures (fig.14-a), les autres auteurs ne sont pas intervenus sur la matrice de raideur, qui avait toujours une rigidité nulle dans cette direction, mais sur la loi σ-ε du béton en traction, qui intervient, au moment de l'obtention des contraintes non équilibrées (fig.14-b).



TENSILE STRESS - STRAIN CURVE

fig. 14-a



TENSILE CONCRETE STRESS - STRAIN

Fig. 14-b

II - <u>Liaison entre le béton et les armatures</u>

La prise en compte des armatures a été envisagée de deux façons différentes :

a) Les aciers étaient considérés comme des éléments linéaires, travaillant seulement dans le sens de leur longueur, c'est à dire, sans aucune rigidité transversale.

b) Les armatures étaient supposées constituer un milieu continu. A la place des aciers individuels, on supposait une distribution continue des aciers à l'intérieur de chaque

élément de béton. La raideur de l'élément était obtenue par superposition de celles des deux matériaux constituants, béton et acier : $[D]_{\text{élément}} = [D]_{\text{béton}} + \sum_{1}^{n} [D^i]_{\text{aciers}}$, [D] étant la matrice qui relie les sollicitations et les déformations de l'élément : $\{S\} = [D]\{\varepsilon\}$; n'est le nombre de directions de renforcement (non nécessairement orthogonales). La contribution des aciers se fait seulement dans les directions des armatures, aucune collaboration transversale n'étant considérée.

— Au cas b), la compatibilité entre les déformations de l'acier et celles du béton est toujours parfaite. Par contre, le modèle a) permet de reproduire, bien que de façon approchée, le phénomène d'adhérence entre le béton et l'acier, par lequel se fait la transmission des efforts entre les deux matériaux. L'adhérence parfaite n'existe que pour de bas niveaux de transmission d'efforts. Au delà, il se produit un glissement relatif entre le béton et l'acier, qui est de moins en moins gêné par le frottement mécanique entre les deux matériaux. Cela est particulièrement important au voisinage des fissures et y entraîne d'appréciables modifications dans les distributions des efforts. De nombreux facteurs y interviennent, tels que le niveau des contraintes transmises, le diamètre et le type des armatures, la qualité du béton, la longueur d'imbibition à partir de la surface de rupture, les contraintes dans l'acier, etc...

Certains auteurs ont essayé d'introduire ce phénomène dans leurs modèles, en supposant, de façon approchée, que le glissement relatif entre l'acier et le béton était seulement fonction du niveau des contraintes transmises : NGO et SCORDELIS (Réf. 14), NILSON (Réf. 53), MUFTI et autres (Réf. 64), CEDOLIN et POLI (Réf. 26 et 29).

Cela se faisait au moyen des éléments-ressort, qui reliaient les noeuds du béton et de l'acier. Ces éléments n'ont pas de dimensions physiques, seules leurs propriétés mécaniques

sont importantes. Les constantes mécaniques K_n et K_v relient les déplacements relatifs (glissements) de l'acier (noeud 'j') et du béton (noeud 'i'), aux efforts transmis (fig.15-b).

NGO a considéré que les coefficients des ressorts étaient constants. NILSON, par contre, a supposé une perte progressive de l'adhérence, en adoptant le diagramme glissements-efforts d'adhérence empirique (Réf. 54) que nous présentons dans la fig. 15-c.

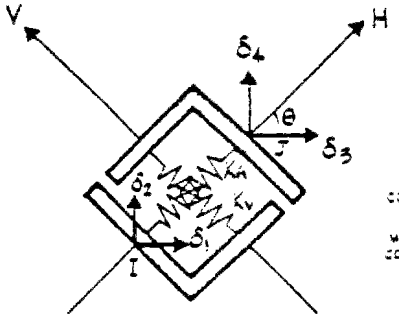


Fig. 15-a

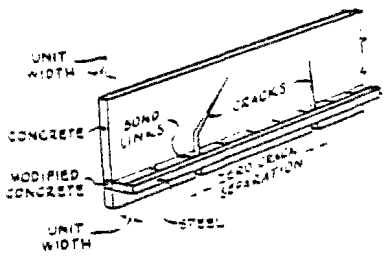


Fig. 15-b

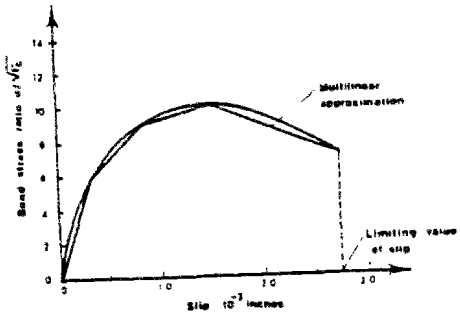


Fig. 15-c

III - <u>Les modèles de comportement non linéaire du béton sous charge biaxiale</u>

— Quelques auteurs, NGO (Réf. 14) et COLVILLE (Réf. 56), se sont limités à la considération de la fissuration comme la seule cause de non linéarité. Le béton était, par conséquent, supposé avoir un comportement linéaire et élastique en compression.
Parmi ceux qui ont étudié l'influence du comportement non linéaire du béton en compression, nous pouvons citer deux groupes :

A) Ceux qui ont supposé un comportement élastoplastique et isotrope pour le béton, (réf.59,60,61,62,65,66, 69), ce qui leur a permis d'appliquer la formulation mathématique de la plasticité, bien établie déjà pour le calcul des structures métalliques. Le béton y est supposé vérifier le critère de plasticité de Von Mises, ainsi que le principe de la normalité.

ÉCOLE DES PONTS & CHAUSSÉES BIBLIOTHÈQUE

B) Ceux qui ont supposé un comportement non linéaire du béton jusqu'à la rupture. Dans la plupart des cas, ils se sont basés sur les résultats expérimentaux de KUPFER, de LIU, et de TASUJI, déjà commentés au paragraphe 1.2 de cette annexe.

Ceux-ci peuvent à leur tour, se diviser en deux groupes :

1.- Ceux qui ont adopté un modèle de comportement du béton isotrope :

— ROMSTAD, TAYLOR et HERRMANN (Réf. 68) ont développé un modèle multilinéaire pour le comportement biaxial du béton. Ils partaient des recherches sur le comportement du béton en compression uniaxiale, où ils distinguaient quatre zones :

a) une région initiale à comportement élastique et linéaire, jusqu'à 30 % environ de la charge ultime;

b) une région présentant une certaine non linéarité (amorce des fissures sur les bords des plus grands agrégats), jusqu'à 85 % environ de la rupture;

c) une zone, assez courte, à comportement fortement non linéaire (début du développement des fissures à travers le mortier), jusqu'à la charge ultime (100%);

d) une branche descendante, jusqu'à 90 % de la charge ultime.

Les auteurs ont constaté que les changements volumétriques brusques qui délimitent ces 4 zones, se produisaient dans les essais en bicompression, aux mêmes pourcentages environ de la résistance ultime correspondante, que pour les essais en compression uniaxiale. Ce qui leur permettait de délimiter les quatre zones sur tout le domaine C-C. En T-T le comportement a été supposé linéaire et élastique (première zone) . En C-T, une transition a été adoptée qui éliminait progressivement les zones 4,3 et 2 (voir fig.16-a).

A l'intérieur de chaque zone, le béton est supposé avoir un comportement linéaire et isotrope défini par les modules E et ν , dont les valeurs pour chacune des zones étaient

déterminées directement à partir des essais de compression uniaxiale, et estimées tel que suit :

Zone	E	ν
1	E_o	0.20
2	0,7 E_o	0.20
3	0,15 E_o	0.30
4	- 0,075 E_o	0.50

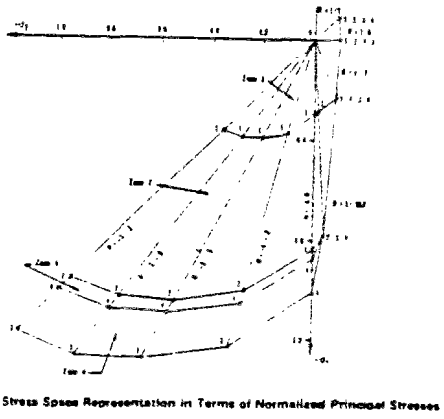


Fig.16-a

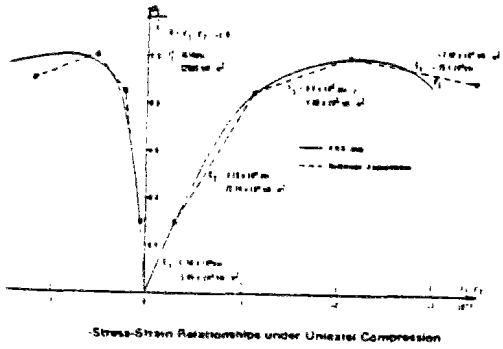


Fig.16-b

— KUPFER et GERSTLE (Réf. 59), ont travaillé en décomposant l'état de déformations dans ses composantes hydrostatique et déviatorique $\varepsilon_{ij} = \delta_{ij}\,\sigma_m/3K + s_{ij}/2G$,
K étant le module de compression et G le module de déformation transversale, qui en élasticité linéaire sont reliés aux modules E et ν par les expressions :

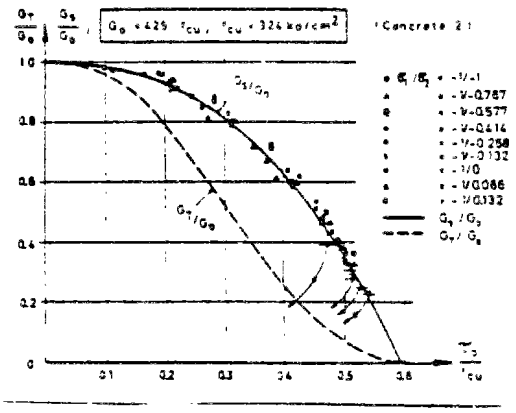
$K = E/[3(1-2\nu)]$ et $G = E/[2(1+\nu)]$. Si l'on travaille dans le plan octaedrique , les rapports entre les contraintes et les déformations sont : $K = \dfrac{\sigma_o}{3\varepsilon_o}$ et $G = \dfrac{\tau_o}{2\gamma_o}$.

A partir des résultats des essais (fig.17), les auteurs ont proposé des formulations analytiques qui rapportent les modules tangents G_T et K_T (ou sécants G_s et K_s), respecti-

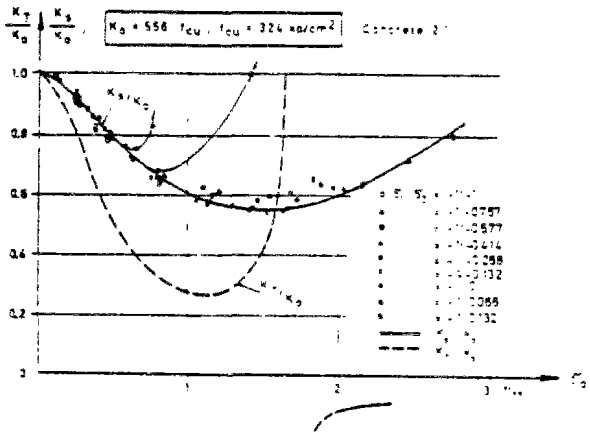
vement à la contrainte octaédrique de cisaillement τ_0, et à la déformation γ_0, qui existent à chaque instant du chargement:

$$G_T = G_0 \frac{\left[1 - a\left(\frac{\tau_0}{f_{cu}}\right)^m\right]^2}{1 + (m-1)a\left(\tau_0/f_{cu}\right)^m} \quad \text{et} \quad K_T = K_0 \frac{G_T / G_0}{e^{-(c\gamma_0)^p}\left[1 - p(c\gamma_0)^p\right]}$$

où les coefficients a, m,p et c sont fonction de la qualité du béton.



-Shear Modulus G—Octahedral Shear Stress τ_0 Relation



-Bulk Modulus K—Octahedral Shear Strain γ_0 Relation

Fig.17-a

Fig.17-b

Les coefficients G_T et K_T, dont la valeur à chaque stade du chargement est ainsi estimée, sont ensuite introduits dans la matrice qui relie les augmentations des contraintes et des déformations d'un matériau isotrope :

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} = 4\, G_T \frac{3K_T + G_T}{3K_T + 4G_T} \begin{bmatrix} 1 & \frac{3K_T - 2G_T}{2(3K_T + G_T)} & 0 \\ \frac{3K_T - 2G_T}{2[3K_T + G_T]} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3K_T + 4G_T}{4[3K_T + G_T]} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Cette matrice peut être directement utilisée dans la formulation des éléments finis.

2.- Ceux qui ont adopté pour le béton un modèle incrémental, où le béton était supposé avoir un comportement orthotrope vis-à-vis des successives augmentations de la charge, où les directions principales des contraintes sont les axes d'orthotropie.:

La matrice $[D]_T$ qui relie les augmentations des contraintes et des déformations a, par conséquent, la forme (rapportée aux directions principales) :

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_I \\ d\sigma_{II} \\ d\tau \end{Bmatrix} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \begin{bmatrix} 1 & \nu_{21} & 0 \\ \nu_{21} & \nu_{21}/\nu_{12} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{1+2\nu_{12}+\dfrac{\nu_{12}}{\nu_{21}}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_I \\ d\varepsilon_{II} \\ d\gamma \end{Bmatrix}$$

avec $E_1\ \nu_{21} = E_2\ \nu_{12}$, et I et II les directions principales, variables avec l'état de sollicitation de l'élément.

C'est dans l'obtention des coefficients tangents E_i et ν_{ij}, que réside la difficulté d'un tel modèle. Différentes solutions ont été proposées :

— LIU et autres (Réf. 21 et 25), en se limitant au domaine de bicompression, ont constaté que l'augmentation réelle de la raideur du béton en une direction, en présence d'une autre compression en direction normale à celle-ci, ne peut pas être uniquement expliquée par l'effet de Poisson, mais que la réduction du potentiel de microfissuration, qui se produit sous des sollicitations biaxiales, y a une influence importante.

Ils ont proposé une formulation analytique des lois $\sigma - \varepsilon$, analogue à celle de SAENZ pour le cas uniaxial (Réf. 27), qui par dérivation, donne :

$$E'_i = \frac{E_0\left[1-\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iu}}\right)^2\right]}{(1-\nu\alpha)\left[1+\left(\frac{1}{1-\nu\alpha}\,\frac{E_0\varepsilon_{iu}}{\sigma_{iu}}-2\right)\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iu}}\right)+\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iu}}\right)^2\right]^2}$$

$\alpha = \dfrac{\sigma_I}{\sigma_{II}}$ = rapport des contraintes principales.

Une telle expression permet donc de tenir compte des deux effets déjà mentionnés, puisque le coefficient $\nu\alpha$ intervient non seulement dans l'effet de Poisson, mais aussi dans l'évaluation même de la raideur tangente E_{bi} .

Les auteurs ont montré que l'accord entre une telle loi et les lois obtenues dans les essais est suffisamment acceptable.

Quant aux ν_{ij} , l'égalité $E_1\nu_{21} = E_2\,\nu_{12}$, leur permet de tout mettre en fonction d'un seul ν_{12}, qu'ils ont pris égal à 0.2. Etant donné que E_1 et E_2 , obtenus d'après l'expression précédente, sont variables et que ν_{21} est pris implicitement égal à $0.2\,E_2/E_1$ dans l'expression de $[D]_T$, ν_{21} est donc variable et le modèle introduit un comportement différent et arbitraire entre les deux directions principales, ce qui peut entraîner des problèmes de convergence.

— CEDOLIN et POLI (Réf. 26 et 29), ont élargi le modèle proposé par LIU aux domaines de C-T et T-T. En bitraction, le béton est supposé élastique, linéaire et isotrope, de même qu'en compression-traction, quand le rapport traction/compression est supérieur à 0.5.

Dans le reste de la zone C-T, ils ont adopté une loi $\sigma-\varepsilon$, semblable à celle de LIU, mais où la condition de pente nulle à la rupture, valable en C-C, n'était plus imposée.
La loi proposée est :

$$\sigma_i = \frac{E_0\,\varepsilon_i}{(1-\nu\alpha)\left[1+\left(\frac{1}{1-\nu\alpha}\,\frac{E_0\varepsilon_{iu}}{\sigma_{iu}}-1\right)\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iu}}\right)\right]}$$, ce qui donne

une expression pour le module tangent :

$$E'_{t_i} = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = \frac{E_{bi}}{(1-\nu\alpha)} \quad ; \quad E_{bi} = \frac{E_o}{\left[1 + \left(\frac{1}{1-\nu\alpha}\,\frac{E_o\,\varepsilon_{iu}}{\sigma_{iu}} - 1\right)\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iu}}\right)\right]^2}$$

—DARWIN et PECKNOLD (Réf. 70 et 71), ont proposé un modèle absolument symétrique par rapport aux deux directions principales :

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_I \\ d\sigma_{II} \\ d\tau \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} E_1 & \nu\sqrt{E_1E_2} & 0 \\ \nu\sqrt{E_1E_2} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (E_1+E_2-2\nu\sqrt{E_1E_2})/4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_I \\ d\varepsilon_{II} \\ d\gamma \end{Bmatrix}$$

où $\nu = \sqrt{\nu_{12}\,\nu_{21}}$ est un "module de Poisson équivalent", variable avec l'état de sollicitations du matériau.

Dans un état biaxial de sollicitations, la déformation en une direction n'est pas seulement fonction de la contrainte dans cette direction, mais aussi de celle sur l'autre, du fait de l'effet de Poisson. Les auteurs essayent de séparer les deux effets moyennant le concept de "déformation uniaxiale équivalente", $\varepsilon_{i_{eq}}$, qui est la déformation qui existerait dans une direction si une contrainte zéro agissait en direction orthogonale.

Pour un matériau non linéaire, les "déformations uniaxiales équivalentes" valent :

$$\varepsilon_{i_{eq}} = \sum_{\substack{\text{tous les in-}\\ \text{crémentsde la}\\ \text{charge}}} \frac{\Delta\sigma_i}{E_i} \quad ,$$

et sont associées aux directions principales équivalentes.

La rotation des directions principales, dans le cas de chargement non proportionnel, est prise en compte dans le modèle, en calculant les $\Delta\varepsilon_{i_{eq}}$ de la forme ;

$\Delta \varepsilon_{i_{eq}} = \frac{(\sigma_{i,\,nouvelle} - \sigma_{i,\,ancienne})}{E_i}$, où $\sigma_{i,\,ancienne}$ et E_i correspondent aux directions principales avant l'application de la charge, et $\sigma_{i,\,nouvelle}$ à celles d'après.

Pour déterminer les modules tangents E_1 et E_2, ils considérent une famille de diagrammes $\sigma - \varepsilon$ "uniaxiaux", pour chaque direction principale, qui ont les $\varepsilon_{i_{eq}}$ en abcisses, et dont l'expression est analogue à celle de SAENZ (Réf. 27) pour la compression uniaxiale : $\sigma_i = \frac{E_o\,\varepsilon_{i_{eq}}}{\left[1 + \left[(E_o\,\varepsilon_{iu})/\sigma_{iu} - 2\right](\varepsilon_{i_{eq}}/\varepsilon_{iu}) + \left(\frac{\varepsilon_{i_{eq}}}{\varepsilon_{iu}}\right)^2\right]}$, où σ_{iu} et ε_{iu} sont obtenues d'après des expressions analytiques qui approchent les résultats expérimentaux de KUPFER. Elles sont fonction du rapport α des contraintes principales à chaque moment, et par conséquent les lois $\sigma_i - \varepsilon_{i_{eq}}$ le sont aussi.

Une fois que la charge est appliquée, on obtient la $\Delta \varepsilon_{i_{eq}}$ dans les deux directions principales (en tenant compte de la rotation de celles-là), et le rapport α, qui nous permet d'entrer dans la courbe $\sigma_i - \varepsilon_{i_{eq}}$ correspondante, et de calculer les nouveaux E_1 et E_2.

Dans la réf. 70, les auteurs ont présenté l'élargissement du modèle pour permettre la considération des charges cycliques (chargements et déchargements).

— LINK (réf. 72 et 73), est parti des courbes expérimentales fournies par KUPFER, où l'on montrait les valeurs des E_i^s et ν_{ij}^s sécants obtenues dans les essais.

Il en a tiré les courbes rapportées aux valeurs tangentes, en assimilant la tangente à la corde entre des points suffisamment proches (fig.18)

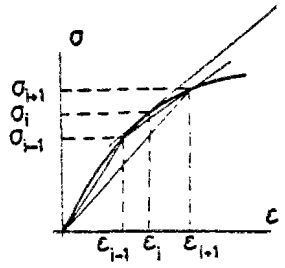


Fig. 18

$$E_i^s = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$$

$$E_i^T = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \simeq \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}} = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\dfrac{\sigma_{i+1}}{E^s_{i+1}} - \dfrac{\sigma_{i-1}}{E^s_{i-1}}}$$

Ces courbes, qui sont montrées dans la fig. 19, ont été approchées analytiquement par des expressions, fonctions des contraintes principales. Ces expressions sont d'une énorme complexité, ce qui doit augmenter sensiblement le temps de calcul par ordinateur.

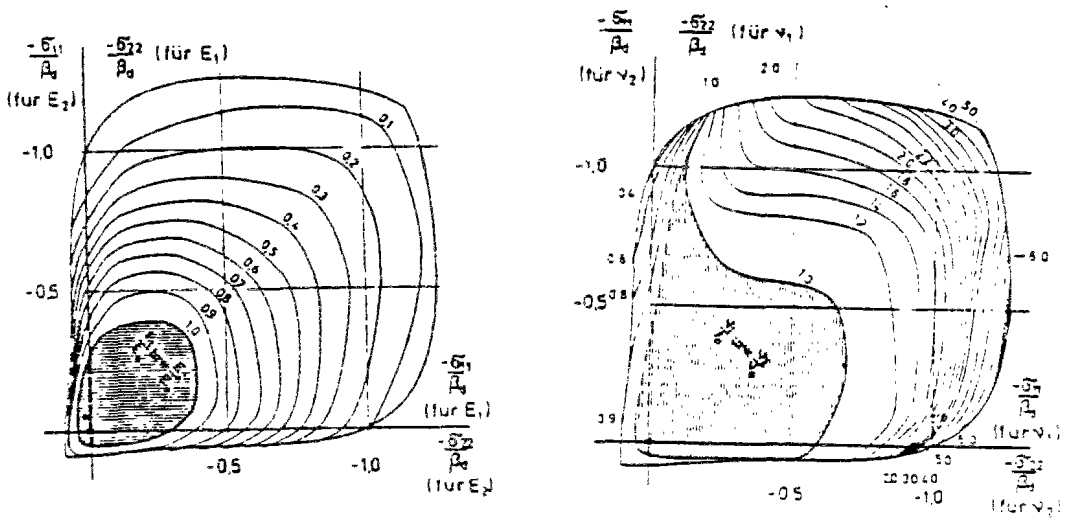


Fig.19.

2.2.- Etudes incorporant la flexion

Comme nous l'avons déjà indiqué au paragraphe 9 du chapitre 3, l'étude de la flexion a été envisagée de deux façons différentes :

A) Une première approche consiste à adopter des lois moment-courbure, théoriques ou expérimentales, qui réflètent convenablement la diminution progressive de la raideur de la section au fur et à mesure du chargement.

Sauf au premier stade du chargement, où le matériau est supposé élastique et isotrope, on adopte une formulation orthotrope selon les deux directions de moments principaux. On ne considère pas d'interaction entre les effets de ces deux moments principaux , ce qui permet d'étudier la dalle en supposant un comportement de poutre sur les deux directions principales, dans lesquelles des lois moment-courbure unidimensionnelles sont adoptées.

Les fissures sont supposées apparaître dans le plan normal au moment principal qui produit des tractions au-delà de la résistance du béton.

Ces méthodes, utilisées pour le calcul de dalles, ne permettent pas la prise en compte des effets de membrane, qui apparaissent par suite du comportement non linéaire de la section, quand les centres mécanique et géométrique de celle-ci ne coïncident pas.

— JOFRIET et Mc.NEICE (Réf. 74) ont étudié la flexion d'une dalle. Ils ont adopté une loi moment-courbure empirique et bilinéaire, qui représente la raideur à flexion de la section avant et après la fissuration. Cette dernière est approchée moyennant un "moment d'inertie effectif", obtenu empiriquement, qui tient compte de la collaboration du béton tendu entre fissures et de la contribution effective des armatures orthogonales, qui traversent une fissure, dont la direction n'est pas la même que celle des aciers. Ils ne considéraient pas le comportement non élastique des aciers et du béton en compression.

— BELL et ELMS (Réf. 75 et 76), obtenaient théoriquement les lois moment-courbure des sections, en adoptant pour l'acier un diagramme élastoplastique avec raffermissement, et pour le béton un diagramme parabolique en compression et linéaire en traction. La raideur des éléments fissurés tenait aussi compte de la collaboration du béton tendu entre fissures.

B) Une deuxième approche suppose la section divisée en couches, dont chacune peut avoir un comportement différent vis à vis des sollicitations, ou bien être composée d'un différent matériau. Ces couches sont supposées travailler dans leur plan, et sont reliées entre elles par une certaine relation de compatibilité des déformations (cf. 3.10).

Une telle méthode permet l'étude conjointe des efforts plans et de flexion (cf.3.12), ce qui la rend très adéquate au calcul de coques minces en béton armé, où existent simultanément des efforts de membrane et de flexion.

— B. WHANG (Réf. 77), a développé une formation analytique complète, en vue du calcul de dalles lamées orthotropes et de coques minces.

— SCANLON et MURRAY (réf. 58), ont utilisé pour la première fois cette méthode dans un calcul par éléments finis d'une dalle en béton armé. Ils ont supposé un comportement linéaire et élastique de l'acier et du béton en compression, la fissuration étant la seule cause de non linéarité considérée. Les fissures étaient supposées se développer dans les sens parallèle et perpendiculaire aux armatures.

Dans une autre publication (Réf. 78) SCANLON a incorporé le traitement des effets de longue durée (fluage et retrait) dans le béton.

— LIN et SCORDELIS (Réf. 52), HAND et autres (Réf. 51), ont étudié des coques minces en béton armé, soumises à des sollicitations de flexion et à des efforts dans leur plan.

Les premiers ont adopté des lois élastoplastiques pour l'acier et pour le béton en compression, les deux matériaux respectant le critère de plastification de Von Mises. En traction, le béton suivait une loi linéaire jusqu'à la rupture , au delà de laquelle on considérait un déchargement progressif suivant une parabole de troisième degré, de façon à tenir compte de la collaboration du béton tendu entre fissures.

HAND a considéré le béton comme un matériau isotrope avec un diagramme bilinéaire élastoplastique en compression. La zone élastique était donc divisée en deux sous zones avec un module d'élasticité différent ($E_2 < E_1$), et se continuait par une troisième plastique, avec $E_3 = 0$, où l'écoulement est gouverné par le critère de Von Mises.

-Une Approche similaire a été utilisée parWANCHOO et MAY(réf.79).

-GILBERT etWARNER(réf.80),se sont servis de la même méthode pour étudier l'influence de différentes techniques de simulation de la collaboration du béton tendu entre fissures.Notamment,ils ont comparé les quatre suivantes:

a) Le modèle de SCANLON (fig.14-a).

b) Le modèle de LIN (fig.14-b).

c) Ce dernier ,mais en établissant une bruque réduction (du 20%), de la contrainte de traction,au moment même de la fissuration,après quoi on continue avec un déchargement progressif,similaire à celui de la fig.14-b.

d)Un modèle simple,qui reflète la collaboration du béton par l'intermédiaire d'un accroissement de la raideur des aciers (de Ea), brusque au moment de la fissuration,et s'éteignant au fur et à mesure que la fissure augmente.Le béton n'est pas supposé collaborer,une fois qu'il se fissure.

La collaboration du béton tendu des différentes couches n'est pas constante,mais fonction de la proximité des armatures.Pour celles qui sont loin des aciers,cette collboration est supposée négligeable.

3.-Références bibliographiques.-

34.-S.POPOVICS.- "A Review of Stress-Strain Relationships for Concrete". ACI JOURNAL.Mars 1970.

35.-F.E.RICHART,A.BRANDTZAEG et R.L.BROWN.-"A Study of the Failure Mechanism of Concrete under Combined Stresses". University of Illinois.Bulletin 185.Nov.1928.

36.-C.J.BELLAMY.-"Strength of Concrete under Combined Stresses". ACI JOURNAL.Oct.1961.

37.-D.Mc.HENRY et J.KARNI.-"Strength of Concrete under Combined Tensile and Compressive Stress".ACI JOURNAL.Avril 1958.

38.-B.BRESLER et K.S.PISTER.-"Strength of Concrete under Combined Stresses".-ACI JOURNAL.Sept.1958.

39.-B.BRESLER et K.S.PISTER.-"Failure of Plain Concrete under Combined Stresses".-ASCE.V81.Separate nr.674.Avril 1955.

40.-C.D.GOODE et M.A.HELMY.-"The Strength of Concrete under Combined Shear and Direct Stress".-Magazine of Concrete Research. Juin 1967.

41.-R.P.JOHNSON et P.G.LOWE.-"Behavior of Concrete under Biaxial and Triaxial Stress".-Civil Engineering Materials Conference.Southampton.1969.

42.-A.FÖPPL.-"Mitteilungen aus dem Mech. Technischen Laboratorium der Koenig Techn. Hochschule".Nr.27 et 28.Technischen Hochschule.Munich.1899 et 1900.

43.-G.WÄSTLUND.-"New Evidence Regarding the Basic Strength Properties of Concrete".Betong.Stockholm.V 3.1937.

44.-J.GLOMB.-"Die Ausnutzbarkeit Zweiachsiger Festigkeit des Betons in Flächentragwerken".3ème. Congrès de Béton Précontraint. Berlin.1958.

45.-H.WEIGLER et G.BECKER.-"Untersuchungen über das Bruch-und Verformungsverhalten von Beton bei Zweiachsiger Beanspruchung". Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton.V 157.Berlin.1963.

46.-S.R.IYENGAR,K.CHANDRASHEKHARA et K.T.KRISHNASWAMY.-"Strength of Concrete under Biaxial Compression".-ACI JOURNAL. Février 1965.

47.-G.S.ROBINSON.-"Behaviour of Concrete in Biaxial Compression".Journal of the Structural Division.ASCE.Février 1967.

48.-G.W.D.VILE.-"The Strength of Concrete under Short Term Static Biaxial Stress".International Conference Structure of Concrete.Londres.1965.

49.-S.SCHRÖEDER et H.OPITZ.-"Festigkeit und Verformungseigenschaften der Betons bei zweiachsiger Druckbeanspruchung".Bauplanung-Bautechnik.Vol 22.Avril 1968.

50.-L.L.MILLS et R.M.ZIMMERMAN.-"Compressive Strength of Plain Concrete under Multiaxial Loading Conditions".ACI JOURNAL. Oct.1970.

51.-H.HILSDORF.-"Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit von Beton". Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton.V 173.Berlin .1965.

52.-A.STEGBAUER et D.LINSE.-"Comparaison of Stress-Strain Behaviour of Concrete and Other Materials under Biaxial Loading". Colloque de la RILEM.Cannes.1972.

53.-A.H.NILSON.-"Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by Finite Element Method".ACI JOURNAL.Sept.1968.

54.-A.H.NILSON.-"Internal Mesurement of Bond-Slip".ACI JOURNAL.Juillet 1972.

55.-R.E.LOOV.-"The Determination of Stresses and Deformations of Reinforced Concrete After Cracking".Civil Engineering Materials Conference.Southampton.1969.

56.-J.COLVILLE et J.ABBASI.-"Plane Stress Reinforced Concrete Finite Elements".Journal of the Structural Division.ASCE. Mai 1974.

57.-W.C.SCHNOBRICH,M.H.SALEM,D.A.PECKNOLD,et B.MOHRAZ.- "Nonlinear Stress Analysis of Reinforced Concrete".Journal of the Structural Division.ASCE.Oct.1972.

58.-A.SCANLON et D.W.MURRAY.-"An Analysis to Determinate the Effects of Cracking in Reinforced Concrete Slabs".Proceedings of the Specialty Conference on Finite Element Method in Civil Engineering.Mc.Gill University.Montreal.Juin 1972.

59.-O.YUZUGULLU et W.C.SCHNOBRICH.-"A Numerical Procedure for the Determination of the Behaviour of a Shear Wall Frame System".ACI JOURNAL.Juillet 1973.

60.-M.SUIDAN et W.C.SCHNOBRICH.-"Finite Element Analysis of Reinforced Concrete".Journal of the Structural Division. ASCE.Oct.1973.

61.-F.R.HAND,D.A.PECKNOLD.et W.C.SCHNOBRICH.-"Nonlinear Layered Analysis of Reinforced Concrete Plates and Shells".Journal of the Structural Division.ASCE.Juillet 1973.

62.-C.S.LIN et A.C.SCORDELIS.-"Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form".Journal of the Structural Division.ASCE. Mars 1975.

63.-J.ISENBERG et S.ADHAM.-"Analysis of Orthotropic Reinforced Concrete Structures".Journal of the Structural Division. ASCE.Dec.1970.

64.-A.A.MUFTI,M.S.MIRZA,J.O.Mc CUTCHEON et R.S.POKOWSKI.-"A Study of Nonlinear Behaviour of Structural Concrete Elements". Proceedings of the Specialty Conference on Finite Elements Method in Civil Engineering.Mc.Gill University.Montreal.Juin 1972.

65.-A.C.T.CHEN et W.F.CHEN.-"Constitutive Relations for Concrete"-Journal of the Engineering Mechanics Division. ASCE.Août 1975.

66.-S.VALLIAPAN et T.F.DOOLAN.-"Nonlinear Stress Analysis of Reinforced Concrete".Journal of the Structural Division. ASCE.Avril 1972.

67.-V.CERVENKA et K.H.GERSTLE.-"Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Panels".Memoires AIPC.V 31.II.1971.

68.-K.M.ROMSTAD,M.A.TAYLOR et L.R.HERRMAN.-"Numerical Biaxial Characterization for concrete".Journal of the Engineering Mechanics Division.ASCE.Oct.1974.

69.-H.B.KUPFER etK.H.GERSTLE.-"Behavior of Concrete under Biaxial Stresses".Journal of the Engineering Mechanics Division.ASCE.Août 1973.

70.-D.DARWIN et D.A.PECKNOLD.-"Analysis of RC Shear Panels under Cyclic Loading".Journal of the Structural Division; ASCE.Février.1976.

71.-D.DARWIN et D.A.PECKNOLD.-"Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete".Journal of the Engineering Mechanics Division.ASCE.Avril 1977

72.-J.LINK,H.SCHAFER et G.MEHLHORN.-"Eine Formulierung des zweiachsigen Bruchund Verformungsverhaltens von Beton". Beton und Stahlbetonbau..Heft 9.1974.

73.-J.LINK.-"Eine Formulierung des zweiaxialen Verformungs-und Bruchverhaltens von Beton und deren Anwendung auf die Wirklichkeitsnahe Berechnung von Stahlbetonplatten".Deutscher ausschuss für Stahlbeton; Heft 270. 1976.

74.-J.C.JOFRIET et G.M.Mc NEICE.-"Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Slabs".ASCE.Journal of the Structural Division.Mars 1971.

75.-J.C.BELL et D.G.ELMS.-"A Finite Element Approach to Post-Elastic Slab Behaviour".International Symposium on Reinforced Concrete Slabs .Denver.Mars 1971. ACI Special Publication SP-30.1972.

76.-J.C.BELL et D.G.ELMS.-"Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Slabs". Magazine of Concrete Research.Juin 1972.

77.-B.WHANG.-"Laminated Orthotropic Plates and Shallow Shells".Computers & Structures.V 1.Pergamon Press.1971.

78.-A.C.SCORDELIS.-"Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures".Proceedings of the Specialty Conference on Finite Element Methods in Civil Engineering.Mc.Gill University . Montreal.Juin 1972.

79.-M.K.WANCHOO et G.W.MAY.-"Cracking Analysis of Reinforced Concrete Plates".Journal of the Structural Division. ASCE.Janvier 1975.

80.-I.GILBERT et R.F.WARNER.-"Tension Stiffening in Reinforced Concrete Slabs".-Journal of the Structural Division. ASCE.Décembre 1978.

ANNEXE 'B' - SERIE DE PROGRAMMES 'CPC'

Elle comporte les sous-programmes suivants : CPC, CPC1, CP10, CPC2, CP20, CP21, CPC3, CP30, CPC4, CP40, CP41, CP42, CPC5, CP50, et DCPR.

1.- Description des variables du 'common'

INAM (3).- Vecteur avec le nom des sous-programmes, nécessaire pour établir la liaison entre ceux-ci. Par exemple :
INAM (1) = 2 HCP, INAM (2) = 2 HC5,
INAM (3) = 2H .

IGO (5).- Vecteur avec les différentes options du programme :
IGO (1) = (unité logique de lecture des données + 100 x unité logique de lecture du nom du fichier de stockage des résultats).
IGO (2) = unité logique d'écriture.
IGO (3) = 0; si le programme doit calculer les K_i du bossage (cf. 2.3.2.2)
1; si les K_i sont introduits comme données
IGO (4) = 0; résolution du système d'équations et obtention des efforts hyperstatiques dans les coupures : f_n, v_n, m_n et φ_{yn}
2; calcul des contraintes, à partir des valeurs de f_n, v_n, m_n et φ_{yn}, stockés sur un fichier.
1; écriture des valeurs des contraintes.
IGO (5) = 1; tracé des courbes de contraintes.
0; rien.

ITIP.- Nombre de bossages (de 0 à 4)
RLP .- 'L', cm. (cf. fig. 2.2)
NS .- Nombre de divisions du bossage (cf. fig.2.4), jusqu'à 13.
NNN .- Nombre de termes du développement en séries de Fourier
ESP .- Epaisseur du hourdis (cm.)

PI .- 3.141592

EL .- Module d'élasticité du béton (kg/cm2)

RNU .- Module de Poisson du béton

BB (7).- Largeur (cm) des (ITIP+1)bandes longitudinales (cf. fig. 2.23), jusqu'à un maximum de 5.

BB (6) .- Largeur (cm) dela bande 'c' (cf.fig.2.6)

BB (7) .- Idem de la bande 'd'.

XI (2,16) .- Pour deux bandes possibles munies de bossage, abscisses (cm.) des (NS + 3) points qui délimitent les (NS + 2) divisions de la bande (cf. fig. 2.12).

HI (15) .- Hauteur (cm) des (NS + 2) divisions (cf.fig.2.20)

FRI (15).- Cote du point de passage du câble dans le les (NS + 2) divisions (cf.fig.2.20)

CB (15) .- cos β_r des (NS + 2) divisions (cf.fig.2.20).

RK (3,15).- Coefficients K_{NN} , K_{TT} et K_{MM}, des (NS + 2) divisions (cf. 2.3.2.2.).

FPT .- Force de précontrainte (kg).

KNAM (3) .- Nom du fichier pour le stockage des résultats (efforts hyperestatiques, si IGO (4) = 0; valeurs des contraintes, si IGO (4) = 2).

LBUF (100).- Vecteur auxiliaire

IWO (6) .- Vecteur auxiliaire, utilisé par les subroutines 'BWR' et 'SWO', pour les transferts entre la mémoire centrale et l'aire de travail du disque.

2.- Listings .-

```
SCPC   T=00003 IS ON CR00030 USING 00024 BLKS R=0000

0001          FTN4,B
0002   C----      DATE: 13/ 1/78
0003          PROGRAM CPC
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*         PROGRAMME POUR LE CALCUL ELASTIQUE APPROCHE DES       *
0007   C*         ANCRAGES EN BOSSAGE:                                  *
0008   C*                                                               *
0009   C*         LECTURE DES DONNEES.                                  *
0010   C*                                                               *
0011   C*****************************************************************
0012          DIMENSION IP(5),IHEUR(5),JBUF(768),IDCB(144)
0013          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0014         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0015         C,IWO(6),KNAM(3)
0016   C----
0017   C----
0018   C---- PARAMETRES OPTIONNELS
0019   C---- IGO(1):UN.LOG.LECTURE+100 * UN.LOG.LECTURE KNAM
0020   C---- IGO(2):UN.LOG.ECRITURE
0021   C---- IGO(3):LECTURE DES RAIDEURS(0,1)
0022   C---- IGO(4):CALCUL INITIAL(0),SORTIE RESULTATS SANS CALCUL(1)
0023   C----         CALCUL CONTRAINTES(2)
0024   C---- IGO(5):TRACE DE COURBES(0,1)
0025   C----
0026          CALL RMPAR(IGO)
0027          IP(4)=0
0028   C****
0029          IF((IGO(4).NE.1).AND.(IGO(5).NE.0))STOP111
0030          IF((IGO(4).NE.0).AND.(IGO(3).NE.1))STOP222
0031   C****
0032          INAM(1)=2HCP
0033          INAM(2)=2HC1
0034          INAM(3)=2H
0035          PI=3.141592654
0036          FPT=10000.
0037          LU=IGO(1)/100
0038          IGO(1)=MOD(IGO(1),100)
0039          KNAM(3)=2H
0040          READ(LU,5)KNAM
0041   5      FORMAT(3A2)
0042          LU=IGO(1)
0043          LU1=IGO(2)
0044          CALL EXEC(11,IHEUR)
0045   C----      MATERIAU
0046          READ(LU,*)EL,RNU
0047          WRITE(LU1,10)IHEUR(4),IHEUR(3),IHEUR(2),KNAM,EL,RNU
0048   10     FORMAT(10/,X,"***  PROGRAMME 'CPC' POUR LA METHODE DES"
0049         C" COUPURES  ***",5/,X"HEURES  :"I5,/X"MINUTES :"I5,/X
0050         C"SECONDES:"I5,2/,X"STOCKAGE SUR LE FICHIER: "3A2,5/,X"*DONNEES*",
0051         C3/,X"M.ELAS (KG/CM2):"F10.2,/,X"M.POISSON:"F16.2)
0052   C----      DIMENSIONS ET PARAMETRES GENERAUX
0053          READ(LU,*)ITIP,NS,NNN,ESP,RLP,BB(6),BB(7)
0054          WRITE(LU1,20)ITIP,NS,NNN,ESP,RLP,BB(6),BB(7)
0055          BB(6)=BB(6)-BB(7)
0056          NN=NNN
0057   20     FORMAT(2/,X"NOMBRE DE BOSSAGES:"I14,/X"NOMBRE DIVISIONS"
0058         C" BOSSAGE:"I8,/,X"NOMBRE TERMES SERIE FOURIER:"I5,2/,X
0059         C"EPAISSEUR(CM):"F14.2,/,X"PERIODE(CM):"F16.2,/,X"HAUTEUR CAISSON"
0060         C"(CM):"F8.2,/,X"ZONE INFERIEURE(CM):"F8.2)
0061          AUX=(4*NN*ITIP+1.)*(4*NN*ITIP)*2.
0062          N=IFIX(AUX/(96.*64.))+1+1
0063          CALL EXEC(15,N,IWO(1),I,IWO(3))
0064          IWO(2)=IWO(1)-1+N
0065   C****
0066          IF(IWO(1).LT.0)STOP333
0067          IF((IWO(3).NE.96).OR.(I.NE.2))STOP444
0068   C****
0069   C----      LARGEURS DE ZONES
0070          I=ITIP+1
0071          READ(LU,*)(BB(J),J=1,I)
0072          WRITE(LU1,30)(1H ,J,BB(J),J=1,I)
0073   30     FORMAT(3/,X,"LARGEURS DES ZONES(CM):"2/,5(A1"ZONE "I2":"
0074         CF6.2,3X))
0075   C****
0076          IF((I.GT.3).AND.(BB(2).NE.BB(4)))STOP555
0077   C****
0078   C---- LES LARGEURS DES ZONES SONT STOCKEES DIVISEES PAR DEUX
```

```
0079          DO 40 J=1,I
0080   40     BB(J)=BB(J)/2.
0081          BB(6)=BB(6)/2.
0082          BB(7)=BB(7)/2.
0083   C----      BOSSAGE
0084          DO 200 I=1,2
0085          IF(I.EQ.2)GO TO 70
0086          WRITE(LU1,50)
0087   50     FORMAT(3/,X"BOSSAGES:"/,X"ZONE:"4X"HAUTEUR(CM):"4X,"Z.CABLE(CM):")
0088          DO 60 J=1,NS+2
0089          READ(LU,*)HI(J),FRI(J)
0090          WRITE(LU1,55)J,HI(J),FRI(J)
0091   55     FORMAT(I4,F13.2,F16.2)
0092   60     CONTINUE
0093   70     READ(LU,*)XI(I,2),XI(I,NS+2)
0094   C****
0095          IF((I.EQ.2).AND.(XI(2,NS+2)-XI(2,2).NE.XI(1,NS+2)-XI(1,2)))
0096         CSTOP666
0097   C****
0098          XI(I,1)=0.
0099          XI(I,NS+3)=RLP
0100          AUX=(XI(I,NS+2)-XI(I,2))/NS
0101          DO 80 J=1,NS-1
0102   80     XI(I,2+J)=XI(I,2)+AUX*J
0103          IF(I.EQ.2)GO TO 89
0104          AUX=FRI(1)
0105          DO 85 J=1,NS+1
0106          AUX0=FRI(J)-AUX
0107          CB(J)=COS(ATAN(AUX0*2./(XI(1,J+1)-XI(1,J))))
0108          FRI(J)=FRI(J)-HI(J)/2.
0109          AUX=AUX+2.*AUX0
0110   85     CONTINUE
0111          FRI(1)=0.
0112          CB(NS+2)=1.
0113          FRI(NS+2)=0.
0114   89     WRITE(LU1,90)I
0115   90     FORMAT(3/,X"BOSSAGE:"I2,4X"ZONE:"4X"XA(CM):"4X"XB(CM):"4X
0116         C"FC(CM):"4X"CB:")
0117          DO 100 J=1,NS+2
0118          WRITE(LU1,95)J,XI(I,J),XI(I,J+1),FRI(J),CB(J)
0119   95     FORMAT(15X,I4,3F11.2,F9.4)
0120   100    CONTINUE
0121          IF(ITIP.LE.2)GO TO 210
0122   200    CONTINUE
0123   C----      RAIDEURS EQUIVALENTES
0124   210    IF(IGO(3).EQ.0)GO TO 216
0125          INAM(2)=2HC2
0126          WRITE(LU1,211)
0127   211    FORMAT(3/,X,"RAIDEURS EQUIVALENTES:"/X,"ZONE:"8X
0128         C"KN"8X"KT"8X"KM"8X"KV")
0129          DO214 I=1,3
0130          READ(LU,*)(RK(I,J),J=1,NS+2)
0131   214    CONTINUE
0132          DO212 I=1,NS+2
0133          AUX=(ESP/HI(I))**3
0134          WRITE(LU1,213)I,(RK(J,I),J=1,3),AUX
0135   213    FORMAT(I5,X,4F10.3)
0136   212    CONTINUE
0137   C----      CHANGEMENT DE PROGRAMME
0138   216    IF(IGO(4).NE.0)GOTO250
0139   215    WRITE(LU1,219)(IWO(J),J=1,3)
0140   219    FORMAT(3/,X"STOCKAGE SUR L'AIRE DE TRAVAIL:"/" IWO(1)="I5
0141         C" IWO(2)="I5" IWO(3)="I5)
0142          WRITE(LU1,220)
0143   220    FORMAT(10/)
0144          IF(IGO(4).EQ.0)LBUF(1)=1
0145          CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0146          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0147          GOTO999
0148   C----      LECTURES POUR LA SORTIE DE RESULTATS
0149   250    INAM(2)=2HC4
0150          WRITE(LU1,260)
0151   260    FORMAT(3/,X,"IZ:"5X"IT:"5X"IC:"5X"IV:")
0152          DO 300 I=1,50
0153          READ(LU,*)IZ,IT,IC,IV
0154          LBUF(2*I-1)=IT*1000+IC*10+IABS(IZ)
0155          LBUF(2*I)=IV
0156          IF(IZ)270,310,270
0157   270    WRITE(LU1,280)IZ,IT,IC,IV
0158   290    FORMAT(I3,3I8)
```

```
0159  300    CONTINUE
0160         I=51
0161  310    I=I-1
0162         IF(IGO(4).EQ.2)GOTO215
0163  C----    LECTURE DES LE FICHIER 'KNAM(3)'
0164         INAM(2)=2HC5
0165         IWO(4)=IWO(1)
0166         IWO(5)=0
0167         IWO(6)=0
0168         I=I*180
0169         K=1
0170         CALL OPEN(IDCB,IERR,KNAM)
0171  C****
0172         IF(IERR.NE.1)STOP224
0173  C****
0174  320    L=MINO(I,768)
0175         CALL READF(IDCB,IERR,JBUF,L,LEN,K)
0176  C****
0177          IF(IERR.NE.0)STOP225
0178  C****
0179         CALL BWR(2,IWO,JBUF,L)
0180         K=K+6
0181         I=I-L
0182         IF(I.GT.0)GOTO320
0183         CALL CLOSE(IDCB)
0184         GOTO215
0185   999   END
0186         END$
```

```
SCPC1   T=00003 IS ON CR00020 USING 00024 BLKS R=0000

0001          FTN4,B
0002   C----      DATE: 13/ 1/78
0003          PROGRAM CPC1
0004   C*************************************************************
0005   C*                                                           *
0006   C*         PROGRAMME POUR L'OBTENTION DES RAIDEURS EQUIVALENTES *
0007   C*         DU BOSSAGE.                                       *
0008   C*                                                           *
0009   C*************************************************************
0010          DIMENSION C(15),COEF(15,15),TCF(30),XY(30),IP(5)
0011         C,ITXO(44),RAUX(44)
0012          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0013         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0014         C,IWO(6),KNAM(3)
0015          EQUIVALENCE(TCF,XY)
0016   C----
0017   C----
0018          CALL RMPAR(IP)
0019          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0020          INAM(2)=2H10
0021   C----
0022   C----      IPACO=0:CALCUL DES RAIDEURS
0023   C----      IPACO=1:CALCUL DES RAIDEURS ET DES CONTRAINTES DANS TOUTE
0024   C----                LA SECTION
0025   C----      IPACO=2:CALCUL DES RAIDEURS AVEC ECRITURE DES CONTRAINTES
0026   C----                ET DEPLACEMENTS AUX BORDS
0027          NN=15
0028          IPACO=0
0029   C----
0030          JJ=0
0031          LU1=IGO(2)
0032   C----
0033   C----      RIGIDITES VIS-A-VIS DE L'EFFORT TRANCHANT
0034   C----
0035          DO 50 I=1,NS+1
0036          AUX=ESP/HI(I)
0037          RK(2,I)=1./(AUX*(1.+3.*(1.-AUX)**2))
0038    50    CONTINUE
0039   C----
0040   C----      RIGIDITES VIS A VIS DE L'EFFORT NORMAL
0041   C----
0042   C----      CAS SYMETRIQUE
0043          A0=BB(2)
0044          A03=A0*A0*A0
0045          DO 5000 I=1,NS+1
0046          B0=HI(I)/2.
0047          B03=B0*B0*B0
0048          BE0=(B0-ESP)/B0*PI
0049          PAB=PI*A0/B0
0050          PBA=PI*B0/A0
0051          I0=1
0052          I1=1
0053          C0=-ESP/B0
0054          DO 60 J=1,NN
0055   60     C(J)=2./(J*PI)*SIN(J*BE0)
0056   55     U2=0.
0057          U1=0.
0058          DO 65 J=1,NN
0059          DO 65 K=1,NN
0060   65     COEF(J,K)=0.
0061          DO 200 J=1,NN
0062          AUX=J*PAB
0063          CX=CHP(AUX)
0064          SX=SHP(AUX)
0065          AUX=1.+AUX*(CX/SX-SX/CX)
0066          TCF(J)=C(J)/AUX
0067          COEF(J,J)=-1.
0068          AJB=(A0*J/B0)**2
0069          AJ3=4.*J*J*A03/(PI*B03)
0070          DO 150 K=1,NN
0071          AUX0=K*PBA
0072          CX=CHP(AUX0)
0073          SX=SHP(AUX0)
0074          AUX1=1.+AUX0*(CX/SX-SX/CX)
0075          AUX0=(SX/CX)/(1.+AJB/(K*K))**2
0076          AUX0=AJ3/(K*K*K)*AUX0
0077          AUX0=(-1.)**(J+K-1)*AUX0/AUX
0078          AUX0=AUX0/AUX1
```

```
0079          BKA=(B0*K/A0)**2
0080          BK3=4.*K*K*B03/(PI*A03)
0081          DO 100 L=1,NN
0082          AUX1=L*PAB
0083          AUX1=(SHP(AUX1)/CHP(AUX1))/(1.+BKA/(L*L))**2
0084          AUX1=BK3/(L*L*L)*AUX1
0085          COEF(J,L)=(-1.)**(K+L-1)*AUX1*AUX0+COEF(J,L)
0086    100   CONTINUE
0087    150   CONTINUE
0088    200   CONTINUE
0089    C----
0090    C----  RESOLUTION DE L'EQUATION(TOLERANCE:1.E-06)
0091    C----
0092    310   EPS=1.E-06
0093          CALL GELG(TCF,COEF,NN,1,EPS,IER)
0094          LBUF(1)=2H I
0095          LBUF(2)=2HC,
0096          LBUF(3)=2H11
0097          LBUF(4)=2H,I
0098          LBUF(5)=2HER
0099          LBUF(6)=2H,I
0100          L=100B+IGO(2)
0101          CALL EXEC(2,L,LBUF,-12)
0102          L=1100B+IGO(2)
0103          CALL EXEC(3,L,1)
0104          LBUF(1)=I0
0105          LBUF(2)=I1
0106          LBUF(3)=IER
0107          LBUF(4)=I
0108          CALL IOLIB(2,IGO(2),4,LBUF,4)
0109          IF(IER)320,340,320
0110    320   JJ=1
0111          GO TO 990
0112    340   DO380 K=1,NN
0113          XY(K+NN)=0.
0114          AUX0=K*PBA
0115          CX=CHP(AUX0)
0116          SX=SHP(AUX0)
0117          AUX1=1.+I1*AUX0*(CX/SX-SX/CX)
0118          BKA=(B0*K/A0)
0119          BK3=4*K*K*B03/(A03*PI*AUX1)
0120          IF(I1.EQ.1)GOTO360
0121          BKA=BKA*2.
0122          BK3=BK3*8.
0123    360   DO 370 LL=1,NN
0124          L=LL
0125          IF(I1.EQ.-1)L=2*LL-1
0126          AUX0=L*PAB/((3.-I1)/2.)
0127          AUX0=(SHP(AUX0)/CHP(AUX0))/(1.+BKA*BKA/(L*L))**2
0128          AUX0=(-I1)*(-1.)**(K+LL)*BK3/(L*L)*AUX0*XY(LL)/L
0129          XY(K+NN)=AUX0+XY(K+NN)
0130    370   CONTINUE
0131    380   CONTINUE
0132          GOTO990
0133    C----
0134    C----  CAS ANTISYMETRIQUE
0135    390   DO 400 J=1,2*NN-1,2
0136          JJ=(J+1)/2
0137          AUX=J*PI/(2.*B0)
0138    400   C(JJ)=-2./(J*PI)*(COS(AUX*(B0+ESP))-COS(AUX*(B0-ESP)))
0139          CO=0.
0140    410   DO 450 J=1,NN
0141          DO 450 K=1,NN
0142    450   COEF(J,K)=0.
0143          DO 600 JJ=1,NN
0144          J=2*JJ-1
0145          AUX=J*PAB/2
0146          CX=CHP(AUX)
0147          SX=SHP(AUX)
0148          AUX=1.+AUX*(CX/SX-SX/CX)
0149          TCF(JJ)=C(JJ)/AUX
0150          COEF(JJ,JJ)=-1.
0151          AJB=(A0*J/B0)**2/4
0152          AJ3=J*J*A02/(B03*PI)
0153          DO 500 K=1,NN
0154          AUX0=K*PBA
0155          SX=SHP(AUX0)
0156          CX=CHP(AUX0)
0157          AUX1=1.+AUX0*(SX/CX-CX/SX)
0158          AUX0=(CX/SX)/(1.+AJB/(K*K))**2
```

```
0159          AUX0=AJ3/(K*K)*AUX0/K
0160          AUX0=(-1.)**(JJ+K)*AUX0/AUX
0161          AUX0=AUX0/AUX1
0162          BKA=(B0*K/A0)**2*4.
0163          BK3=32.*K*K*B03/(A03*PI)
0164          DO 480 LL=1,NN
0165          L=2*LL-1
0166          AUX1=L*PAB/2.
0167          AUX1=(SHP(AUX1)/CHP(AUX1))/(1.+BKA/(L*L))**2
0168          AUX1=BK3/(L*L)*AUX1/L
0169          COEF(JJ,LL)=(-1.)**(K+LL)*AUX1*AUX0+COEF(JJ,LL)
0170   480    CONTINUE
0171   500    CONTINUE
0172   600    CONTINUE
0173          GO TO 310
0174   C----
0175   C---- RIGIDITES VIS-A-VIS DE L'EFFORT DE FLEXION
0176   C----
0177   C---- CAS SYMETRIQUE
0178   810    C0=0.
0179          I0=3
0180          I1=1
0181          DO 850 J=1,NN
0182          AUX=J*BE0
0183          C(J)=2./ESP*(ESP/(J*PI)*SIN(AUX)+2.*B0/(J*PI)**2*
0184         C((-1.)**J-COS(AUX)))
0185   850    CONTINUE
0186          GO TO 55
0187   C---- CAS ANTISYMETRIQUE
0188   900    DO 950 J=1,2*NN-1,2
0189          JJ=(J+1)/2
0190          AUX=J*BE0/2.
0191          C(JJ)=4./ESP*(4.*B0/(J*PI)**2*((-1.)*JJ+SIN(AUX))
0192         C+ESP/(J*PI)*COS(AUX))
0193   950    CONTINUE
0194          C0=0.
0195          GO TO 410
0196   C----
0197   C---- CALCUL DES DEPLACEMENTS
0198   C-----
0199   990    II=0
0200   C!!!!
0201          III=0
0202          AA=A0
0203   C!!!
0204          Y0=-B0
0205          KC=1
0206          IF(I0.EQ.1)GO TO 1000
0207          II=1
0208          Y0=-B0+ESP/2.
0209    1000  AUX=C0*A0
0210          TX0=C0
0211          DO 2000 J=1,NN
0212          JJ=J
0213          IF(I1.EQ.-1)JJ=2*J-1
0214          AJ=JJ*PI/(B0*(3.-I1)/2.)
0215          BJ=J*PI/A0
0216          AJY=AJ*Y0
0217          AJA=AJ*A0
0218          BJY=BJ*Y0
0219          BJB=BJ*B0
0220          CSAY=COS(AJY)
0221          SSAY=SIN(AJY)
0222          CHAA=CHP(AJA)
0223          CHBB=CHP(BJB)
0224          SHAA=SHP(AJA)
0225          SHBB=SHP(BJB)
0226          CHBY=CHP(BJY)
0227          SHBY=SHP(BJY)
0228          IF(I1.NE.1)GO TO 1100
0229   C----        CAS SYMETRIQUE
0230          FJ=XY(J)*CSAY*AJ/CHAA
0231          GJ=-XY(J)*CSAY*(1.+AJA*CHAA/SHAA)/CHAA
0232          HJ=-XY(J+NN)/CHBB*(BJY*SHBY-(1.-BJB*CHBB
0233         C/SHBB)*CHBY)
0234          OJ=-FJ
0235          PJ=-XY(J)*CSAY*(1.-AJA*CHAA/SHAA)/CHAA
0236          QJ=XY(J+NN)/CHBB*(BJY*SHBY-(1.-BJB*CHBB
0237         C/SHBB)*CHBY)
0238          GO TO 1200
```

```
C----      CAS ANTISYMETRIQUE
 1100 FJ=XY(J)*SSAY*AJ/CHAA
      GJ=-XY(J)*SSAY*(1.+AJA*CHAA/SHAA)/CHAA
      HJ=-XY(J+NN)/SHBB*(BJY*CHBY+(1.-BJB*SHBB
     C/CHBB)*SHBY)
      QJ=-FJ
      PJ=-XY(J)*SSAY*(1.-AJA*CHAA/SHAA)/CHAA
      QJ=XY(J+NN)/SHBB*(BJY*CHBY-(1.+BJB*SHBB
     C/CHBB)*SHBY)
 1200 RJ=(FJ-RNU*QJ)
      SJ=(GJ-RNU*PJ)
      TJ=(HJ-RNU*QJ)
      AUX=AUX+RJ*(A0*CHAA/AJ-SHAA/(AJ*AJ))
     C+SJ*SHAA/AJ
C!!!!
      IF((III.EQ.0).AND.(IPACO.NE.2))GOTO2000
      TX0=TX0+FJ*AA*SHP(AJ*AA)+GJ*CHP(AJ*AA)+HJ*COS(BJ*AA)
C!!!
2000  CONTINUE
C!!!!
C----      CELA CORRESPOND AU CAS IPACO=1
C----       LORS DU SECOND PASSAGE(CALCUL DES CONTRAINTES)
      IF((III.EQ.0).AND.(IPACO.NE.2))GOTO2005
      IF(II.EQ.1)GOTO2005
      IF(II.EQ.-1)GOTO2003
      ITX0(KC)=TX0*1000
      RAUX(KC)=AUX
      GOTO2004
2003  TX0=TX0+ITX0(KC)*0.001
      SAUX=AUX+RAUX(KC)
2004  IF(IPACO.NE.2)GOTO2030
C!!!
C-----CALCUL DES RAIDEURS EQUIVALENTES
2005  GOTO(2010,2006,2008),II+1
2006  U1=AUX
      II=2
      Y0=-B0
      GO TO 1000
2008  U2=U2-(AUX-U1)/(Y0+B0-ESP/2.+1.E-10)
      GOTO2015
2010  U2=U2+AUX
2015  KC=KC+1
      Y0=Y0+ESP/16
      IF((KC.EQ.9).AND.(II.EQ.2))GOTO2015
      IF(KC.LE.17)GOTO1000
C!!!!
      III=1
2020  IF(IPACO.NE.1)GOTO2049
      JK=0
      KC=0
2022  JK=JK+1
      AA=A0/3.*(JK-1)
      JJJ=0
2024  JJJ=JJJ+1
      KC=KC+1
      Y0=B0-0.2*B0*(JJJ-1)
      GOTO1000
2030  IF(JJJ.LE.10)GOTO2024
2035  IF(JK.LE.3)GOTO2022
C!!!
2049  IF(II.EQ.-1)GO TO 2050
      II=-1
      IF(IO.EQ.3)GO TO 900
      GO TO 390
2050  IF(IO.EQ.3)GO TO 2060
      RK(1,I)=-2.*A0/U2*17.
      GO TO 810
2060  RK(3,I)=4.*A0/(ESP*U2)*16.
5000  CONTINUE
      DO5005 I=1,3
5005  RK(I,NS+2)=RK(I,1)
      DO 5100 I=1,3
      DO 5050 J=1,NS+2
      RK(I,J)=1./RK(I,J)
5050  CONTINUE
5100  CONTINUE
C----      CHANGEMENT DE PROGRAMME
C****
      IF(JJ.EQ.1)STOP1000
C****
```

```
      CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
      CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
      END
C----
C----     FONCTION SINUS HYPERBOLIQUE
      FUNCTION SHP(X)
      IF(ABS(X) LT.85.)GOTO5
      SHP=1.E+30
      IF(X.LT.0 )SHP=-SHP
      RETURN
 5    SHP=EXP(X)
      SHP=(SHP-1./SHP)/2
      END
C----     FONCTION COSINUS HYPERBOLIQUE
      FUNCTION CHP(X)
      IF(ABS(X) LT.85.)GOTO5
      CHP=1.E+30
      RETURN
 5    CHP=EXP(X)
      CHP=(CHP+1./CHP)/2.
      END
      END$
```

```
SCP10  T=00003 IS ON CR00020 USING 00004 BLKS R=0000

0001          FTN4,B
0002   C----      DATE: 13/ 1/78
0003          PROGRAM CP10
0004   C*************************************************************
0005   C*                                                           *
0006   C*         PROGRAMME POUR L'ECRITURE DES RAIDEURS EQUIVALENTES *
0007   C*         DU BOSSAGE.                                       *
0008   C*                                                           *
0009   C*************************************************************
0010          DIMENSION IP(5),IHEUR(5)
0011          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0012         CPI,RHO,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0013         C,IWO(6),KNAM(3)
0014   C----
0015   C----
0016          CALL RMPAR(IP)
0017          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0018          INAM(2)=2HC2
0019          LU1=IGO(2)
0020          WRITE(LU1,10)(J,(RK(I,J),I=1,3),J=1,NS+2)
0021    10    FORMAT(3/," ZONE:"4X,"RK-N:"5X"RK-T:"5X"RK-M:"
0022         C/,12(I5,3F10.2,/))
0023          CALL EXEC(11,IHEUR)
0024          WRITE(LU1,15)(IHEUR(JK),JK=4,2,-1)
0025    15    FORMAT(5/X"HEURES  :"I5,/X"MINUTES :"I5,/X"SECONDES:"I5)
0026          CALL EXEC(16,IWO(2)-IWO(1)+1,IWO(1),2)
0027          END
0028          END$
```

```
SCPC2  T=00004 IS ON CR00030 USING 00027 BLKS R=0225

0001          FTN4,B
0002   C-----DATE:   24/ 2/78
0003          PROGRAM CPC2
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*              PROGRAMME POUR LA FORMATION DU SYSTEME D'EQUATIONS *
0007   C*              (BANDES SANS BOSSAGE).                           *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION COEF(801),CC(7),JJ(7),XJ(16),XJN(15),XJT(15),JWO(6)
0011         C,IP(5),IJBUF(1662)
0012          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0013         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NHN
0014         C,IWO(6),KNAM(3)
0015          EQUIVALENCE(LBUF,IENT),(LBUF(2),I),(LBUF(3),J),(LBUF(4),M),
0016         C(LBUF(5),N),(LBUF(6),D),(LBUF(8),IO),(LBUF(9),IT1),
0017         C(LBUF(10),NN),(LBUF(11),IJ),(LBUF(12),AM),(LBUF(14),AN),
0018         C(LBUF(16),GMA),(LBUF(18),GMB),(LBUF(20),GNA),(LBUF(22),GNB),
0019         C(LBUF(24),JJ),(LBUF(32),CC),(LBUF(46),XJ),(LBUF(78),JWO),
0020         C(IJBUF,XJN),(IJBUF(31),XJT),(IJBUF(61),COEF)
0021   C----
0022   C----      FONCTION INDIC
0023   C----
0024          INDIC(N,IG,ID,NN)=NN*4*(IG-1)+NN*(ID-1)+N
0025   C----
0026   C----      FONCTIONS A,B,C,D(E.NORMAL)
0027   C----
0028          FA(GN,RNU)=2.*(CLN(GN)*CHP(GN)+CKN(GN)*SHP(GN))-(1.+RNU)
0029   C----
0030          FB(GN)=2.*(CLN(GN)*CHP(GN)-CKN(GN)*SHP(GN))
0031   C----
0032          FC(GN)=2.*(CKN(GN)*CHP(GN)+CLN(GN)*SHP(GN))
0033   C----
0034          FD(GN)=2.*(CLN(GN)*SHP(GN)-CKN(GN)*CHP(GN))
0035   C----
0036   C----
0037          CALL RMPAR(IP)
0038          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0039          GOTO(1,900),IENT
0040    1     NN=NHN
0041          IWO(4)=IWO(1)
0042          IWO(5)=0
0043          IWO(6)=0
0044          DO2 I=1,6
0045   2      JWO(I)=IWO(I)
0046          D=EL*ESP**3/(12.*(1.-RNU**2))
0047   C----      IT1=0 : SANS BOSSAGE POUR Y= +D
0048   C----      IT1=1 : AVEC BOSSAGE POUR Y= +D
0049          IT1=1
0050          DO 5 J=1,NS+3
0051   5      XJ(J)=XI(1,J)
0052          CALL EST(HI,BB(2),XJN,XJT,NS)
0053   C----      "DO" POUR LES EQUATIONS DANS TOUTES LES COUPURES
0054          I=0
0055   6      I=I+1
0056          IF(I.NE.3)GO TO 15
0057          DO 10 J=1,NS+3
0058    10    XJ(J)=XI(2,J)
0059    15    IT1=1-IT1
0060   C----      "DO" POUR LES EQUATIONS DES 4 DEPLACEMENTS
0061          J=0
0062    18    J=J+1
0063   C----      "DO" POUR LES NN EQUATIONS DE CHAQUE DEPLACEMENT (M=TERME FOURI
0064          M=0
0065    19    M=M+1
0066          DO 20 N=1,4*NN*ITIP+1
0067   20     COEF(N)=0.
0068          AM=PI/(2.*RLP)*(2*M-1)
0069          GMA=AM*BB(I)
0070          GMB=AM*BB(I+1)
0071   C----      "DO" POUR LES COLONNES(N=TERME FOURIER)
0072          N=0
0073   28     N=N+1
0074          AN=PI/(2.*RLP)*(2*N-1)
0075          GNA=AN*BB(I)
0076          GNB=AN*BB(I+1)
0077          DO 30 IJ=1,7
0078          CC(IJ)=0.
```

```
0079   30      JJ(IJ)=0
0080   C----      IJ=1 : COTE Y= +D
0081   C----      IJ=-1: COTE Y= -D
0082           IJ=1
0083   C----      IO=0 : NON ENCASTREMENT DANS LE COTE ETUDIE
0084   C----      IO=1 :     ENCASTREMENT DANS LE COTE ETUDIE
0085           IO=0
0086           IF(I.EQ.1)IO=1
0087           IF(IT1.EQ.1)GOTO7000
0088           GO TO(100,150,200,250),J
0089   C----       ZONES SANS BOSSAGE
0090   C----       (V);(O)
0091    100    IF(M.NE.N)GO TO 1000
0092           AUXO=RLP/(EL*AM)
0093           AUX=AUXO*IJ
0094    105    JJ(1)=INDIC(M,I,1,NN)
0095           CC(1)=AUX*FC(GMA)
0096           JJ(2)=INDIC(M,I,2,NN)
0097           CC(2)=AUXO*FA(GMA,RNU)
0098           IF(IO.EQ.1)GO TO 110
0099           JJ(3)=INDIC(M,I-IJ,1,NN)
0100           CC(3)=AUX*FD(GMA)
0101           JJ(4)=INDIC(M,I-IJ,2,NN)
0102    110    CC(4)=-AUXO*FB(GMA)
0103    120    IF(IO.NE.1)GO TO 1000
0104   C&&&&
0105   C&&&&  CC(4)=0.(BORDS LIBRES).
0106   C&&&&
0107           AUX1=FE(AM*BB(6))
0108           IF(BB(7).LT.1.)GOTO135
0109           EC=AUX1
0110           AUX1=AM*BB(6)
0111           AUX2=AM*BB(7)
0112           ED=FE(AUX2)
0113           AC=FA(AUX1,RNU)
0114           AD=FA(AUX2,RNU)
0115           BE=FC(AUX1)+FC(AUX2)
0116           AUX1=(BE*EC*ED-EC*AD*AD-ED*AC*AC)/(BE*(EC+ED)-(AC-AD)**2)
0117    135    CC(1)=CC(1)+CC(4)*FB(GMA)/(FE(GMA)+AUX1)
0118           CC(2)=CC(2)-CC(4)*FF(GMA)/(FE(GMA)+AUX1)
0119           GO TO 1000
0120   C----       (U);(O)
0121    150    IF(M.NE.N)GO TO 1000
0122           AUX=RLP/(EL*AM)
0123           AUXO=AUX*IJ
0124    155    JJ(1)=INDIC(M,I,1,NN)
0125           CC(1)=AUX*FA(GMA,RNU)
0126           JJ(2)=INDIC(M,I,2,NN)
0127           CC(2)=AUXO*FE(GMA)
0128           IF(IO.EQ.1)GO TO 160
0129           JJ(3)=INDIC(M,I-IJ,1,NN)
0130           CC(3)=AUX*FB(GMA)
0131           JJ(4)=INDIC(M,I-IJ,2,NN)
0132    160    CC(4)=AUXO*FF(GMA)
0133           GO TO 120
0134   C----       (F1);(O)
0135   200     IF(M.NE.N)GO TO 1000
0136           AUX=RLP/(D*(1.-RNU)*(1.-RNU)*AM)*IJ
0137           AUXO=RLP/(2.*D*(1.-RNU)*AM*AM)
0138           JJ(1)=INDIC(M,I,3,NN)
0139           CC(1)=AUX*FO(GMA,RNU)
0140           JJ(2)=INDIC(M,I,4,NN)
0141           CC(2)=-AUXO*FM(GMA,RNU)
0142           IF(IO.EQ.1)GO TO 210
0143           JJ(3)=INDIC(M,I-IJ,3,NN)
0144           JJ(4)=INDIC(M,I-IJ,4,NN)
0145   210     CC(3)=AUX*FP(GMA,RNU)
0146           CC(4)=AUXO*FN(GMA,RNU)
0147   220     IF(IO.NE.1)GO TO 1000
0148   C&&&&
0149   C&&&&  CC(3)=0.(BORDS LIBRES).
0150   C&&&&  CC(4)=0.(BORDS LIBRES).
0151   C&&&&
0152           CC(1)=CC(1)+CC(3)*CN1(AM,GMA,RNU)
0153           CC(1)=CC(1)+CC(4)*CN2(AM,GMA,RNU)
0154           CC(2)=CC(2)+CC(3)*CN3(AM,GMA,RNU)
0155           CC(2)=CC(2)+CC(4)*CN4(AM,GMA,RNU)
0156           GO TO 1000
0157   C----       (W);(O)
0158   250     IF(M.NE.N)GO TO 1000
```

```
0159          AUX=RLP/(2.*D*(1.-RNU)*AM*AM)
0160          AUX0=-RLP/(D*(1.-RNU)*(1.-RNU)*AM*AM*AM)*IJ
0161          JJ(1)=INDIC(M,I,3,NN)
0162          CC(1)=AUX*FM(GMA,RNU)
0163          JJ(2)=INDIC(M,I,4,NN)
0164          CC(2)=AUX0*FQ(GMA,RNU)
0165          IF(I0.EQ.1)GO TO 260
0166          JJ(3)=INDIC(M,I-IJ,3,NN)
0167          JJ(4)=INDIC(M,I-IJ,4,NN)
0168   260    CC(3)=AUX*FN(GMA,RNU)
0169          CC(4)=AUX0*FR(GMA,RNU)
0170          GO TO 220
0171   C----
0172   C----      ACCUMULATION DES COEFFICIENTS SUR "COEF"
0173   C----
0174    900   JWO(4)=JWO(2)
0175          JWO(5)=0
0176          JWO(6)=0
0177          CALL BWR(1,JWO,IJBUF,1662)
0178   1000   DO 1200 I2=1,7
0179          IF(JJ(I2).EQ.0)GO TO 1200
0180          IF(JJ(I2).GT.0)GO TO 1050
0181          COEF(4*ITIP*NN+1)=COEF(4*ITIP*NN+1)+CC(I2)*(1-2*IT1)
0182          GO TO 1200
0183   1050   IF(JJ(I2).LE.4*NN*ITIP)GO TO 1160
0184          DO 1150 I3=1,4
0185          IF(JJ(I2).NE.4*NN*ITIP+NN*(I3-1)+N)GO TO 1150
0186          JJ(I2)=JJ(I2)-4*NN
0187          IF((I3.EQ.2).OR.(I3.EQ.4))CC(I2)=-CC(I2)
0188          GO TO 1160
0189   1150   CONTINUE
0190          STOP 1771
0191   1160   COEF(JJ(I2))=COEF(JJ(I2))+CC(I2)*IJ
0192   1200   CONTINUE
0193          IF(IJ.EQ.-1)GO TO 1220
0194          I0=0
0195          DO 1210 I2=1,7
0196          CC(I2)=0.
0197   1210   JJ(I2)=0
0198   1220   AUX=GMA
0199          GMA=GMB
0200          GMB=AUX
0201          AUX=GNA
0202          GNA=GNB
0203          GNB=AUX
0204          AUX=BB(I)
0205          BB(I)=BB(I+1)
0206          BB(I+1)=AUX
0207          IF(IJ.EQ.-1)GO TO 8500
0208          IJ=-1
0209          IF(IT1.EQ.1)GO TO (100,150,200,250),J
0210   7000   INAM(2)=2H20
0211          IF(J.GT.2)INAM(2)=2H21
0212          JWO(4)=JWO(2)
0213          JWO(5)=0
0214          JWO(6)=0
0215          CALL BWR(2,JWO,IJBUF,1662)
0216          GOTO9990
0217   8500   IF(N.LT.NN)GOTO28
0218          CALL BWR(2,IWO,COEF,2*(4*ITIP*NN+1))
0219   8700   IF(M.LT.NN)GOTO19
0220   8800   IF(J.LT.4)GOTO18
0221   9000   IF(I.LT.ITIP)GOTO6
0222          INAM(2)=2HC3
0223   C----
0224   C----      CHANGEMENT DE SEGMENT
0225   9990   CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0226          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0227          END
0228   C-----
0229   C-----
0230   C----
0231   C----
0232   C----
0233   C----      SUBROUTINE POUR LE CALCUL DES MODULES D'INERTIE
0234   C----      ET DE TORSION DANS LE BOSSAGE
0235   C----
0236          SUBROUTINE EST(HI,BB,XJN,XJT,NS)
0237          DIMENSION XJN(1),XJT(1),HI(1)
0238          DO 100 I=1,NS+2
```

```
      XJN(I)=2.*BB*HI(I)**3/12.
      A=AMIN1(2.*BB,HI(I))
      B=AMAX1(2.*BB,HI(I))
      AUX=0.
      DO 50 J=1,101,2
      AUX0=J*3.141592*B/(2.*A)
      IF(AUX0.GT.85.)GOTO55
      AUX=AUX+SHP(AUX0)/(CHP(AUX0)*FLOAT(J)**5)
50    CONTINUE
55    XJT(I)=A*A*A*B/3.*(1.-192.*A*AUX/(B*3.141592**5))
      IF((I.LT.2).OR.(I.EQ.NS+2))XJT(I)=XJT(I)/2.
 100  CONTINUE
      END
C----
C----     FONCTION SINUS HYPERBOLIQUE
      FUNCTION SHP(X)
      SHP=EXP(X)
      SHP=(SHP-1./SHP)/2
      END
C----
C----     FONCTION COSINUS HYPERBOLIQUE
      FUNCTION CHP(X)
      CHP=EXP(X)
      CHP=(CHP+1./CHP)/2.
      END
C----
C----     FONCTIONS CN DANS L'ENCASTREMENT
C----
      FUNCTION CN0(AM,GMA,RNU)
      CN0=-(-FM(GMA,RNU)*FM(GMA,RNU)/4.+FQ(GMA,RNU)*FO
     C(GMA,RNU)/((1.-RNU)*(1.-RNU)))/AM
      END
C----
      FUNCTION CN2(AM,GMA,RNU)
      CN2=(FO(GMA,RNU)*FN(GMA,RNU)-FP(GMA,RNU)*FM
     C(GMA,RNU))/(2.*(1.-RNU)*CN0(AM,GMA,RNU))
      END
C----
      FUNCTION CN1(AM,GMA,RNU)
      CN1=(-FN(GMA,RNU)*FM(GMA,RNU)/4.+FP(GMA,RNU)*FQ
     C(GMA,RNU)/((1.-RNU)*(1.-RNU)))/(CN0(AM,GMA,RNU)*AM)
      END
C----
      FUNCTION CN3(AM,GMA,RNU)
      CN3=(-FN(GMA,RNU)*FQ(GMA,RNU)-FR(GMA,RNU)*FM
     C(GMA,RNU))/(2.*AM*AM*(1.-RNU)*CN0(AM,GMA,RNU))
      END
C----
      FUNCTION CN4(AM,GMA,RNU)
      CN4=(FN(GMA,RNU)*FM(GMA,RNU)/4.+FQ(GMA,RNU)*FR
     C(GMA,RNU)/((1.-RNU)*(1.-RNU)))/(CN0(AM,GMA,RNU)*AM)
      END
C----
C----
C----     FONCTIONS Q,R,S,T(E,VERTICAL);IN,JN,KN,LN(FLEXION)
C----
      FUNCTION CIV(GN,RNU)
      CIV=((1.-RNU)*GN*SHP(GN)+2.*CHP(GN))/((3.+RNU)/2.*SHP
     C(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
      END
C----
      FUNCTION CJV(GN,RNU)
      CJV=((1.-RNU)*GN*CHP(GN)+2.*SHP(GN))/((3.+RNU)/2.*SHP
     C(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
      END
C----
      FUNCTION CKV(GN,RNU)
      CKV=-(1.-RNU)*SHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)+(1.-RNU
     C)*GN)
      END
C----
      FUNCTION CLV(GN,RNU)
      CLV=-(1.-RNU)*CHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)-(1.-RNU
     C)*GN)
      END
C----
      FUNCTION FQ(GN,RNU)
      FQ=CLV(GN,RNU)*CHP(GN)+CKV(GN,RNU)*SHP(GN)
      END
C----
```

```
      FUNCTION FR(GN,RNU)
      FR=-CLV(GN,RNU)*CHP(GN)+CKV(GN,RNU)*SHP(GN)
      END
C----     FONCTION FS=-FM     FONCTION FT=FN
C----
C----
C----      FONCTIONS M,N,O,P(MOMEMT FLECHISSANT);IN,JN,KN,LN(FLEXION)
C----
      FUNCTION CIM(GN,RNU)
      CIM=((1.-RNU)*GN*CHP(GN)-(1.+RNU)*SHP(GN))/((3.+RNU)/2.*
     CSHP(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
      END
C----
      FUNCTION CJM(GN,RNU)
      CJM=((1.-RNU)*GN*SHP(GN)-(1.+RNU)*CHP(GN))/((3.+RNU)/2.*
     CSHP(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
      END
C----
      FUNCTION CKM(GN,RNU)
      CKM=-(1.-RNU)*CHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
      END
C----
      FUNCTION CLM(GN,RNU)
      CLM=-(1.-RNU)*SHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
      END
C----
      FUNCTION FM(GN,RNU)
      FM=(CIM(GN,RNU)+CKM(GN,RNU)*GN)*CHP(GN)+(CJM(GN,RNU)+CLM
     C(GN,RNU)*GN)*SHP(GN)
      END
C----
      FUNCTION FN(GN,RNU)
      FN=(CIM(GN,RNU)-CKM(GN,RNU)*GN)*CHP(GN)-(CJM(GN,RNU)-CLM
     C(GN,RNU)*GN)*SHP(GN)
      END
C----
      FUNCTION FO(GN,RNU)
      FO=CLM(GN,RNU)*SHP(GN)+CKM(GN,RNU)*CHP(GN)
      END
C----
      FUNCTION FP(GN,RNU)
      FP=CLM(GN,RNU)*SHP(GN)-CKM(GN,RNU)*CHP(GN)
      END
C----
C----      FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT NORMAL
C----
      FUNCTION CIN(GN)
      CIN=-(SHP(GN)+GN*CHP(GN))/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
      END
C----
      FUNCTION CLN(GN)
      CLN=SHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
      END
C----
      FUNCTION CJN(GN)
      CJN=-(CHP(GN)+GN*SHP(GN))/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
      END
C----
      FUNCTION CKN(GN)
      CKN=CHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
      END
C----
C----      FONCTIONS E,F,G,H(E.TRANCHANT)
C----
      FUNCTION FE(GN)
      FE=2.*(CKT(GN)*SHP(GN)+CLT(GN)*CHP(GN))
      END
C----
      FUNCTION FF(GN)
      FF=2.*(CKT(GN)*SHP(GN)-CLT(GN)*CHP(GN))
      END
C----    FONCTION FG=FA     FONCTION FH=-FB
C----
C----      FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT TRANCHANT
C----
      FUNCTION CIT(GN)
      CIT=-GN*SHP(GN)/(SHP(2 *GN)+2.*GN)
      END
C----
      FUNCTION CJT(GN)
```

```
      CJT=-GN*CHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
      END
C----
      FUNCTION CKT(GN)
      CKT=SHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
      END
C----
      FUNCTION CLT(GN)
      CLT=CHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
      END
      END$
```

```
SCP20  T=00003 IS ON CR00030 USING 00019 BLKS R=0000

0001          FTN4,B
0002   C-----DATE:  13/ 1/78
0003          PROGRAM CP20
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*              PROGRAMME POUR LA FORMATION DU SYSTEME D'EQUATIONS *
0007   C*              (ZONES AVEC BOSSAGE-EFFORTS PLANS).              *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION COEF(601),CC(7),JJ(7),XJ(16),XJN(15),XJT(15),JWO(6)
0011         C,IP(5),IJBUF(1662)
0012          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),HS,FRI(15),CB(15),
0013         CPI,RHU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0014         C,IWO(6),KNAM(3)
0015          EQUIVALENCE(LBUF,IENT),(LBUF(2),I),(LBUF(3),J),(LBUF(4),M),
0016         C(LBUF(5),N),(LBUF(6),D),(LBUF(8),IO),(LBUF(9),IT1),
0017         C(LBUF(10),NN),(LBUF(11),IJ),(LBUF(12),AM),(LBUF(14),AN),
0018         C(LBUF(16),GMA),(LBUF(18),GMB),(LBUF(20),GNA),(LBUF(22),GNB),
0019         C(LBUF(24),JJ),(LBUF(32),CC),(LBUF(46),XJ),(LBUF(78),JWO),
0020         C(IJBUF,XJN),(IJBUF(31),XJT),(IJBUF(61),COEF)
0021   C----
0022   C----      FONCTION INDIC
0023   C----
0024          INDIC(N,IG,ID,NN)=NN*4*(IG-1)+NN*(ID-1)+N
0025   C----
0026   C----
0027   C----      FONCTIONS A,B,C,D(E.NORMAL)
0028   C----
0029          FA(GN,RHU)=2.*(CLN(GN)*CHP(GN)+CKN(GN)*SHP(GN))-(1.+RHU)
0030   C----
0031          FB(GN)=2.*(CLN(GN)*CHP(GN)-CKN(GN)*SHP(GN))
0032   C----
0033          FC(GN)=2.*(CKN(GN)*CHP(GN)+CLN(GN)*SHP(GN))
0034   C----
0035          FD(GN)=2.*(CLN(GN)*SHP(GN)-CKN(GN)*CHP(GN))
0036   C----
0037   C----
0038   C----
0039   C----      ZONES AVEC BOSSAGE
0040          CALL RMPAR(IP)
0041          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0042          JWO(4)=JWO(2)
0043          JWO(5)=0
0044          JWO(6)=0
0045          CALL BWR(1,JWO,IJBUF,1662)
0046          GOTO(500,600),J
0047   C----      (V);(1)
0048   500    ASSIGN 530 TO ILB
0049          I1=1
0050   510    AUX=0.
0051          DO 520 I2=1,NS+2
0052          AUX0=0.
0053          IF(I2.EQ.NS+2)GOTO516
0054          DO514 I3=I2+1,NS+2
0055          AUX0=AUX0+(RK(I1,I3)+RK(1,I3)-RK(I1,I3-1)-RK(1,I3-1))*0.5*
0056         CCOS(AN*XJ(I3))
0057   514    CONTINUE
0058   516    AUX0=AUX0*(1./AM)*(SIN(AM*XJ(I2+1))-SIN(AM*XJ(I2)))
0059          AUX=AUX+(RK(I1,I2)+RK(1,I2))*0.5*PSI(AM,AN,M,N,XJ(I2+1)
0060         C,XJ(I2),2)+AUX0
0061   520    CONTINUE
0062          IF(I1.EQ.1)AUX1=AUX
0063          GO TO ILB
0064   530    AUX=AUX*2./(EL*AN)
0065          JJ(1)=INDIC(N,I,1,NN)
0066          CC(1)=AUX*FC(GNA)*IJ
0067          JJ(2)=INDIC(N,I-IJ,1,NN)
0068          CC(2)=AUX*FD(GNA)*IJ
0069          I1=2
0070          ASSIGN 540 TO ILB
0071          GO TO 510
0072   540    AUX=2.*AUX/(EL*AN)
0073          JJ(3)=INDIC(N,I,2,NN)
0074          CC(3)=AUX*FA(GNA,RHU)
0075          JJ(4)=INDIC(N,I-IJ,2,NN)
0076          CC(4)=-AUX*FB(GNA)
0077          AUX=AUX1
0078   550    JJ(5)=-1
```

```
0079          CC(5)=2.*AUX*FPP(N,NS,HI,CB,FRI,XJ,RNU,ESP,RLP,FPT,BB(I))*
0080         C(FC(GNA)+FD(GNA))/(EL*AN)*IJ
0081          GO TO 1000
0082   C----      (U);(1)
0083   600    ASSIGN 650 TO ILB
0084          II=1
0085   610    AUX=0.
0086          DO 640 I2=1,NS+2
0087          AUX0=0.
0088          IF(I2.EQ.1)GO TO 625
0089          DO 620 I3=2,I2
0090          AUX0=AUX0+(RK(I1,I3-1)+RK(2,I3-1)-RK(I1,I3)-RK(2,I3))*0.5*
0091         CSIN(AN*XJ(I3))
0092   620    CONTINUE
0093   625    AUX0=AUX0*(-1./AM)*(COS(AM*XJ(I2+1))-COS(AM*XJ(I2)))
0094          AUX=AUX+(RK(I1,I2)+RK(2,I2))*0.5*PSI(AM,AN,M,N,XJ(I2+1),
0095         CXJ(I2),1)+AUX0
0096   640    CONTINUE
0097          IF(I1.EQ.1)AUX1=AUX
0098          GO TO ILB
0099   650    AUX=AUX*2./(EL*AN)
0100          JJ(1)=INDIC(N,I,1,NN)
0101          CC(1)=AUX*FA(GNA,RNU)
0102          JJ(2)=INDIC(N,I-IJ,1,NN)
0103          CC(2)=AUX*FB(GNA)
0104          I1=2
0105          ASSIGN 660 TO ILB
0106          GO TO 610
0107   660    AUX=AUX*2./(EL*AN)
0108          JJ(3)=INDIC(N,I,2,NN)
0109          CC(3)=AUX*FE(GNA)*IJ
0110          JJ(4)=INDIC(N,I-IJ,2,NN)
0111          CC(4)=AUX*FF(GNA)*IJ
0112          AUX=0.
0113          DO 670 I2=1,NS+2
0114          AUX=AUX+CU1(I2,AN,HI,XJN,ESP,XJ)*(-1./AM)*(COS(AM*XJ(I2+1)
0115         C)-COS(AM*XJ(I2)))
0116          AUX=AUX+CU2(I2,HI,XJN,ESP)*PSI(AM,AN,M,N,XJ(I2+1),XJ(I2),1)
0117   670    CONTINUE
0118          AUX=AUX/(EL*AN*AN*AN)
0119          JJ(5)=INDIC(N,I,4,NN)
0120          CC(5)=AUX*IJ
0121          JJ(6)=INDIC(N,I-IJ,4,NN)
0122          CC(6)=-AUX*IJ
0123          JJ(7)=-1
0124          AUX=AUX1
0125   680    CC(7)=2.*AUX*FPP(N,NS,HI,CB,FRI,XJ,RNU,ESP,RLP,FPT,BB(I))*
0126         C(FA(GNA,RNU)+FB(GNA))/(EL*AN)
0127          IF(N.NE.1)GO TO 1000
0128          AUX=0.
0129          DO 690 I2=1,NS+1
0130          C1=COS(AM*XJ(I2))
0131          C2=COS(AM*XJ(I2+1))
0132          AUX=AUX+CU3(I2,HI,FRI,CB,ESP,XJ)*(-1./AM)*(C2-
0133         CC1)
0134          AUX=AUX+CU4(I2,HI,FRI,CB,ESP)*(1./AM)*(-XJ
0135         C(I2+1)*C2+SIN(AM*XJ(I2+1))/AM+XJ(I2)*C1
0136         C-SIN(AM*XJ(I2))/AM)
0137   690    CONTINUE
0138          AUX=AUX+CU5(NS,HI,FRI,CB,ESP,XJ)*(-1./AM)*(COS(AM*XJ(NS+3))-
0139         CCOS(AM*XJ(NS+2)))
0140          CC(7)=CC(7)-2.*FPT*(1.-RNU*RNU)/(EL*2.*BB(I))*AUX
0141   C----
0142   C----
0143    1000   IENT=2
0144          INAM(2)=2HC2
0145          JWO(4)=JWO(2)
0146          JWO(5)=0
0147          JWO(6)=0
0148          CALL BWR(2,JWO,IJBUF,1662)
0149          CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0150          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0151          END
0152   C-----
0153   C----
0154   C----
0155   C----
0156   C----      FONCTION SINUS HYPERBOLIQUE
0157          FUNCTION SHP(X)
0158          SHP=EXP(X)
```

```
0159          SHP=(SHP-1./SHP)/2.
0160          END
0161   C----
0162   C----      FONCTION COSINUS HYPERBOLIQUE
0163          FUNCTION CHP(X)
0164          CHP=EXP(X)
0165          CHP=(CHP+1./CHP)/2.
0166          END
0167   C----
0168   C----      FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT NORMAL
0169   C----
0170          FUNCTION CIN(GN)
0171          CIN=-(SHP(GN)+GN*CHP(GN))/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0172          END
0173   C----
0174          FUNCTION CLN(GN)
0175          CLN=SHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0176          END
0177   C----
0178          FUNCTION CJN(GN)
0179          CJN=-(CHP(GN)+GN*SHP(GN))/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0180          END
0181   C----
0182          FUNCTION CKN(GN)
0183          CKN=CHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0184          END
0185   C----
0186   C----      FONCTIONS E,F,G,H(E.TRANCHANT)
0187   C----
0188          FUNCTION FE(GN)
0189          FE=2.*(CKT(GN)*SHP(GN)+CLT(GN)*CHP(GN))
0190          END
0191   C----
0192          FUNCTION FF(GN)
0193          FF=2.*(CKT(GN)*SHP(GN)-CLT(GN)*CHP(GN))
0194          END
0195   C----     FONCTION FG=FA     FONCTION FH=-FB
0196   C----
0197   C----      FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT TRANCHANT
0198   C----
0199          FUNCTION CIT(GN)
0200          CIT=-GN*SHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0201          END
0202   C----
0203          FUNCTION CJT(GN)
0204          CJT=-GN*CHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0205          END
0206   C----
0207          FUNCTION CKT(GN)
0208          CKT=SHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0209          END
0210   C----
0211          FUNCTION CLT(GN)
0212          CLT=CHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0213          END
0214   C----
0215   C----      FONCTIONS CONCERNANT  LE BOSSAGE
0216   C----
0217   C----      FONCTIONS W(E.TRANCHANT ET E.VERTICAL)
0218   C----
0219          FUNCTION CW2(NP,AN,HI,XIN,ESP,XI,ICOD)
0220          DIMENSION HI(1),XIN(1),XI(1)
0221          CW2=-RO(NP,HI,ESP,XIN,ICOD)*SIN(AN*XI(NP))
0222          IF(NP.EQ.1)RETURN
0223          DO 10 I=1,NP-1
0224          AUX=SIN(AN*XI(I+1))-SIN(AN*XI(I))
0225          CW2=CW2+AUX*RO(I,HI,ESP,XIN,ICOD)
0226    10    CONTINUE
0227          END
0228   C----
0229          FUNCTION RO(I,HI,ESP,XIN,ICOD)
0230          DIMENSION HI(1),XIN(1)
0231          RO=1./XIN(I)
0232          IF(ICOD.EQ.1)RO=RO*(HI(I)-ESP)
0233          END
0234   C----
0235   C----      FONCTIONS U(E.VERTICAL)
0236   C----
0237          FUNCTION CU1(NP,AN,HI,XIN,ESP,XI)
0238          DIMENSION HI(1),XI(1),XIN(1)
```

```
0239          CU1=CW2(NP,AN,HI,XIN,ESP,XI,1)
0240          END
0241    C----
0242          FUNCTION CU2(NP,HI,XIN,ESP)
0243          DIMENSION HI(1),XIN(1)
0244          CU2=RO(NP,HI,ESP,XIN,1)
0245          END
0246    C----
0247    C----     FONCTIONS (U) CONCERNANT LA PRECONTRAINTE
0248    C----
0249          FUNCTION CU3(NP,HI,FR,CB,ESP,XI)
0250          DIMENSION HI(1),FR(1),CB(1),XI(1)
0251          CU3=-ROR(NP,HI,FR,CB,ESP)*XI(NP)
0252          IF(NP.EQ.1)RETURN
0253          DO 10 I=1,NP-1
0254          CU3=CU3+ROR(I,HI,FR,CB,ESP)*(XI(I+1)-XI(I))
0255     10   CONTINUE
0256          END
0257    C----
0258          FUNCTION CU4(NP,HI,FR,CB,ESP)
0259          DIMENSION HI(1),FR(1),CB(1)
0260          CU4=ROR(NP,HI,FR,CB,ESP)
0261          END
0262    C----
0263          FUNCTION ROR(I,HI,FR,CB,ESP)
0264          DIMENSION HI(1),FR(1),CB(1)
0265          ROR=CB(I)/HI(I)*(1.-6.*FR(I)/HI(I)*(1.-ESP/HI(I)))
0266          END
0267    C----
0268          FUNCTION CU5(NS,HI,FR,CB,ESP,XI)
0269          DIMENSION HI(1),FR(1),CB(1),XI(1)
0270          CU5=0.
0271          DO 10 I=1,NS+1
0272          CU5=CU5+ROR(I,HI,FR,CB,ESP)*(XI(I+1)-XI(I))
0273     10   CONTINUE
0274          END
0275    C----
0276    C----     FONCTION PSI
0277    C----
0278          FUNCTION PSI(AM,AN,M,N,XB,XA,ICOD)
0279          AUX=0.
0280          AUX0=XB
0281          DO 200 J=1,-1,-2
0282          IF(ICOD.EQ.2)GO TO 100
0283          IF(M.EQ.N)GO TO 50
0284          AUX=AUX+J*(AN*COS(AN*AUX0)*SIN(AM*AUX0)-AM*COS(AM*AUX0)*SIN
0285         C(AN*AUX0))/(AM*AM-AN*AN)
0286          GO TO 180
0287    50    AUX=AUX+J*(AUX0/2.-SIN(2.*AM*AUX0)/(4.*AM))
0288          GO TO 180
0289    100   IF(M.EQ.N)GO TO 150
0290          AUX=AUX+J*(AM*COS(AN*AUX0)*SIN(AM*AUX0)-AN*COS(AM*AUX0)*SIN
0291         C(AN*AUX0))/(AM*AM-AN*AN)
0292          GO TO 180
0293    150   AUX=AUX+J*(AUX0/2.+SIN(2.*AM*AUX0)/(4.*AM))
0294    180   AUX0=XA
0295    200   CONTINUE
0296          PSI=AUX
0297          END
0298    C----
0299    C----     FONCTION REACTION(POISSON) SUR LE BOSSAGE
0300    C----
0301          FUNCTION FPP(N,NS,HI,CB,FR,XI,RNU,ESP,RLP,FT,BB)
0302          DIMENSION HI(1),CB(1),FR(1),XI(1)
0303          FPP=0
0304          AUX=(2*N-1)*3.141592/(2.*RLP)
0305          DO 10 I=1,NS+1
0306          FPP=FPP+ROR(I,HI,FR,CB,ESP)*(SIN(AUX*XI(I+1))-SIN(AUX*XI(I)))
0307     10   CONTINUE
0308          FPP=FPP*4.*FT/(2.*BB*(2*N-1)*3.141592)*RNU
0309          END
0310    C----
0311          END$
```

```
SCP21  T=00003 IS ON CR00020 USING 00023 BLKS R=0000

0001          FTN4,B
0002   C-----DATE: 13/ 1/78
0003          PROGRAM CP21
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*              PROGRAMME POUR LA FORMATION DU SYSTEME D'EQUATIONS *
0007   C*              (ZONES AVEC BOSSAGE-EFFORTS DE FLEXION).         *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION COEF(801),CC(7),JJ(7),XJ(16),XJN(15),XJT(15),JWO(6)
0011         C,IP(5),IJBUF(1662)
0012          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0013         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0014         C,IWO(6),KNAM(3)
0015          EQUIVALENCE(LBUF,IENT),(LBUF(2),I),(LBUF(3),J),(LBUF(4),M),
0016         C(LBUF(5),N),(LBUF(6),D),(LBUF(8),IO),(LBUF(9),IT1),
0017         C(LBUF(10),NN),(LBUF(11),IJ),(LBUF(12),AM),(LBUF(14),AN),
0018         C(LBUF(16),GMA),(LBUF(18),GMB),(LBUF(20),GNA),(LBUF(22),GNB),
0019         C(LBUF(24),JJ),(LBUF(32),CC),(LBUF(46),XJ),(LBUF(78),JWO),
0020         C(IJBUF,XJN),(IJBUF(31),XJT),(IJBUF(61),COEF)
0021   C----
0022   C----      FONCTION INDIC
0023   C----
0024          INDIC(N,IG,ID,NN)=NN*4*(IG-1)+NN*(ID-1)+N
0025   C----
0026   C----
0027   C----      FONCTIONS M,N,O,P(MOMEMT FLECHISSANT);IN,JN,KN,LN(FLEXION)
0028   C----
0029          CIM(GN,RNU)=((1.-RNU)*GN*CHP(GN)-(1.+RNU)*SHP(GN))/((3.+RNU)/2.*
0030         CSHP(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
0031   C----
0032          CJM(GN,RNU)=((1.-RNU)*GN*SHP(GN)-(1.+RNU)*CHP(GN))/((3.+RNU)/2.*
0033         CSHP(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
0034   C----
0035          CKM(GN,RNU)=-(1.-RNU)*CHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
0036   C----
0037          CLM(GN,RNU)=-(1.-RNU)*SHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
0038   C----
0039          FM(GN,RNU)=(CIM(GN,RNU)+CKM(GN,RNU)*GN)*CHP(GN)+(CJM(GN,RNU)
0040         C+CLM(GN,RNU)*GN)*SHP(GN)
0041   C----
0042          FN(GN,RNU)=(CIM(GN,RNU)-CKM(GN,RNU)*GN)*CHP(GN)-
0043         C(CJM(GN,RNU)-CLM(GN,RNU)*GN)*SHP(GN)
0044   C----
0045          FO(GN,RNU)=CLM(GN,RNU)*SHP(GN)+CKM(GN,RNU)*CHP(GN)
0046   C----
0047          FP(GN,RNU)=CLM(GN,RNU)*SHP(GN)-CKM(GN,RNU)*CHP(GN)
0048   C----      ZONES AVEC BOSSAGE
0049          CALL RMPAR(IP)
0050          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0051          JWO(4)=JWO(2)
0052          JWO(5)=0
0053          JWO(6)=0
0054          CALL BWR(1,JWO,IJBUF,1662)
0055          GOTO(700,800),J-2
0056   C----      (FI)       (1)
0057   700    I4=3
0058          ASSIGN 710 TO ILB
0059          GOTO802
0060   710    AUX=AUX*(FO(GNA,RNU)+FP(GNA,RNU))/(D*AN*(1.-RNU)**2)
0061          JJ(1)=INDIC(N,I,3,NN)
0062          JJ(2)=INDIC(N,I-IJ,3,NN)
0063          CC(1)=AUX*IJ
0064          CC(2)=AUX*IJ
0065          ASSIGN 740 TO ILB
0066   720    AUX=0.
0067          DO 730 I2=1,NS+2
0068          AUX=AUX+(CFI0(NS,AN,HI,XJT,ESP,XJ)+CFI1(I2,AN,HI,XJT,ESP,XJ))
0069         C*(1./AM)*(SIN(AM*XJ(I2+1))-SIN(AM*XJ(I2)))
0070          AUX=AUX+CFI2(I2,AN,HI,XJT,ESP)*PSI(AM,AM,M,N,XJ(I2+1),XJ(I2),2)
0071   730    CONTINUE
0072          GO TO ILB
0073   740    AUX=AUX*2.*2.*(1.+RNU)/(EL*AN*AN)
0074          CC(1)=CC(1)-AUX*IJ
0075          CC(2)=CC(2)+AUX*IJ
0076          JJ(3)=INDIC(N,I,4,NN)
0077          JJ(4)=INDIC(N,I-IJ,4,NN)
0078          AUX=AUX*BB(I)
```

```
0079          CC(3)=AUX
0080          CC(4)=AUX
0081          ASSIGN 750 TO ILB1
0082          GOTO801
0083   750    CC(3)=CC(3)-AUX
0084          CC(4)=CC(4)+AUX
0085          GO TO 1000
0086   C----      (W);(1)
0087   800    ASSIGN 827 TO ILB1
0088   801    ASSIGN 826 TO ILB
0089          I4=4
0090   802    AUX=0.
0091          DO 825 I2=1,NS+2
0092          IF(I4.NE.4)AUX2=RK(I4,I2)
0093          IF(I4.EQ.4)AUX2=XJN(1)/XJN(I2)
0094          AUX0=0.
0095          IF(I2.EQ.NS+2)GO TO 820
0096          AUX3=AUX2
0097          DO 815 I3=I2+1,NS+2
0098          IF(I4.NE.4)AUX1=RK(I4,I3)
0099          IF(I4.EQ.4)AUX1=XJN(1)/XJN(I3)
0100          AUX0=AUX0+(RK(3,I3)+AUX1-RK(3,I3-1)-AUX3)*0.5*COS(AM*XJ(I3))
0101          AUX3=AUX1
0102   815    CONTINUE
0103   820    AUX0=AUX0*(1./AM)*(SIN(AM*XJ(I2+1))-SIN(AM*XJ(I2)))
0104          AUX=AUX+(RK(3,I2)+AUX2)*0.5*PSI(AM,AN,M,N,XJ(I2+1),
0105         CXJ(I2),2)+AUX0
0106   825    CONTINUE
0107          GOTO ILB
0108   826    AUX=AUX*(FM(GNA,RNU)+FN(GNA,RNU))/(2.*D*(1.-RNU)*AM*AN)
0109          GOTO ILB1
0110   827    JJ(1)=INDIC(N,I,3,NN)
0111          JJ(2)=INDIC(N,I-IJ,3,NN)
0112          CC(1)=AUX
0113          CC(2)=AUX
0114          ASSIGN 830 TO ILB
0115          GO TO 720
0116   830    AUX=AUX*2.*2.*(1.+RNU)*BB(I)/(EL*AN*AN)
0117          CC(1)=CC(1)-AUX
0118          CC(2)=CC(2)+AUX
0119          AUX0=AUX
0120          I3=2
0121          ASSIGN 850 TO ILB
0122   835    AUX=0.
0123          DO 840 I2=1,NS+2
0124          S1=SIN(AM*XJ(I2))
0125          S2=SIN(AM*XJ(I2+1))
0126          AUX=AUX+(CW0(NS,AN,HI,XJN,ESP,XJ,RLP,I3)+CW1(I2,AN,HI,
0127         CXJN,ESP,XJ,I3))*(1./AM)*(S2-S1)
0128          AUX=AUX+CW2(I2,AN,HI,XJN,ESP,XJ,I3)*(1./AM)*(XJ(I2+1)*
0129         CS2+COS(AM*XJ(I2+1))/AM-XJ(I2)*S1-
0130         CCOS(AM*XJ(I2))/AM)
0131          AUX=AUX+CW3(I2,AN,HI,XJN,ESP,I3)*PSI(AM,AN,M,N,XJ(I2+1),XJ(I2),2)
0132   840    CONTINUE
0133          GO TO ILB
0134   850    JJ(3)=INDIC(N,I,4,NN)
0135          JJ(4)=INDIC(N,I-IJ,4,NN)
0136          AUX=-2.*AUX/(EL*AN*AN*AN)
0137          CC(3)=AUX*IJ
0138          CC(4)=-AUX*IJ
0139          AUX=AUX0*BB(I)
0140          CC(3)=CC(3)+AUX*IJ
0141          CC(4)=CC(4)+AUX*IJ
0142          I3=1
0143          ASSIGN 870 TO ILB
0144          GO TO 835
0145   870    JJ(5)=INDIC(N,I,2,NN)
0146          JJ(6)=INDIC(N,I-IJ,2,NN)
0147          AUX=AUX*(-ESP)/(EL*AN*AN)
0148          CC(5)=AUX*IJ
0149          CC(6)=-AUX*IJ
0150          IF(N.NE.1)GO TO 1000
0151          JJ(7)=-1
0152          AUX=0.
0153          DO 880 I2=1,NS+1
0154          S1=SIN(AM*XJ(I2))
0155          S2=SIN(AM*XJ(I2+1))
0156          C1=COS(AM*XJ(I2))
0157          C2=COS(AM*XJ(I2+1))
0158          AUX=AUX+(CW4(NS,FRI,CB,XJN,XJ,RLP)+CW5(I2,FRI,CB,XJN,XJ))
```

```
0159          C*(1./AM)*(S2-S1)
0160           AUX=AUX+CW6(I2,FRI,CB,XJN,XJ)*(1./AM)*(XJ(I2+1)*S2
0161          C+C2/AM-XJ(I2)*S1-C1/AM)
0162           AUX=AUX+CW7(I2,FRI,CB,XJN)*(1./AM)*(XJ(I2+1)**2*S2
0163          C+2.*XJ(I2+1)*C2/AM-2.*S2/(AM*AM)
0164          C-XJ(I2)**2*S1-2.*XJ(I2)*C1/AM+
0165          C2.*S1/(AM*AM))
0166    880    CONTINUE
0167           S1=SIN(AM*XJ(NS+2))
0168           S2=SIN(AM*XJ(NS+3))
0169           AUX=AUX+(CW4(NS,FRI,CB,XJN,XJ,RLP)+CW8(NS,FRI,CB,XJN,XJ))*
0170          C(1./AM)*(S2-S1)
0171           AUX=AUX+CW9(NS,FRI,CB,XJN,XJ)*(1./AM)*(XJ(NS+3)*S2
0172          C+COS(AM*XJ(NS+3))/AM-XJ(NS+2)*S1-COS(AM*XJ(NS+2))
0173          C/AM)
0174           CC(7)=-2.*FPT/EL*AUX
0175    C----
0176    C----
0177     1000   IENT=2
0178            INAM(2)=2HC2
0179            JWO(4)=JWO(2)
0180            JWO(5)=0
0181            JWO(6)=0
0182            CALL BWR(2,JWO,IJBUF,1662)
0183            CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0184            CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0185            END
0186    C-----
0187    C----
0188    C----
0189    C----       FONCTIONS CONCERNANT LE BOSSAGE
0190    C----
0191    C----       FONCTIONS W(E.TRANCHANT ET E.VERTICAL)
0192    C----
0193            FUNCTION CW1(NP,AN,HI,XIN,ESP,XI,ICOD)
0194            DIMENSION HI(1),XIN(1),XI(1)
0195            CW1=RO(NP,HI,ESP,XIN,ICOD)*(XI(NP)*SIN(AN*XI(NP))+COS(AN*
0196           CXI(NP))/AN)
0197            IF(NP.EQ.1)RETURN
0198            DO 10 I=1,NP-1
0199            AUX=0.
0200            K=1
0201            DO 5 J=1,0,-1
0202            AUX=AUX+K*(XI(I+J)*SIN(AN*XI(I+J))+COS(AN*XI(I+J))/AN)
0203    5       K=-1
0204            CW1=CW1-AUX*RO(I,HI,ESP,XIN,ICOD)
0205     10     CONTINUE
0206            END
0207    C----
0208            FUNCTION CW2(NP,AN,HI,XIN,ESP,XI,ICOD)
0209            DIMENSION HI(1),XIN(1),XI(1)
0210            CW2=-RO(NP,HI,ESP,XIN,ICOD)*SIN(AN*XI(NP))
0211            IF(NP.EQ.1)RETURN
0212            DO 10 I=1,NP-1
0213            AUX=SIN(AN*XI(I+1))-SIN(AN*XI(I))
0214            CW2=CW2+AUX*RO(I,HI,ESP,XIN,ICOD)
0215     10     CONTINUE
0216            END
0217    C----
0218            FUNCTION CW3(NP,AN,HI,XIN,ESP,ICOD)
0219            DIMENSION HI(1),XIN(1)
0220            CW3=-RO(NP,HI,ESP,XIN,ICOD)/AN
0221            END
0222    C----
0223            FUNCTION CW4(NS,AN,HI,XIN,ESP,XI,RLP,ICOD)
0224            DIMENSION HI(1),XIN(1),XI(1)
0225            CW4=-(CW1(NS+2,AN,HI,XIN,ESP,XI,ICOD)+CW2(NS+2,AN,HI,XIN,ESP,
0226           CXI,ICOD)*RLP)
0227            END
0228    C----
0229            FUNCTION RO(I,HI,ESP,XIN,ICOD)
0230            DIMENSION HI(1),XIN(1)
0231            RO=1./XIN(I)
0232            IF(ICOD.EQ.1)RO=RO*(HI(I)-ESP)
0233            END
0234    C----
0235    C----       FONCTIONS FI(E.VERTICAL ET MOMENT)
0236    C----
0237            FUNCTION CFI1(NP,AN,HI,XIT,ESP,XI)
0238            DIMENSION HI(1),XIT(1),XI(1)
```

```
      CFI1=-RO(NP,HI,ESP,XIT,2)*COS(AN*XI(NP))
      IF(NP.EQ.1)RETURN
      DO 10 I=1,NP-1
      AUX=COS(AN*XI(I+1))-COS(AN*XI(I))
      CFI1=CFI1+AUX*RO(I,HI,ESP,XIT,2)
 10   CONTINUE
      END
C----
      FUNCTION CFI2(NP,AN,HI,XIT,ESP)
      DIMENSION HI(1),XIT(1)
      CFI2=RO(NP,HI,ESP,XIT,2)
      END
C----
      FUNCTION CFI0(NS,AN,HI,XIT,ESP,XI)
      DIMENSION HI(1),XIT(1),XI(1)
      CFI0=-CFI1(NS+2,AN,HI,XIT,ESP,XI)
      END
C----
C----     FONCTIONS CONCERNANT LA PRECONTRAINTE(W)
C----
      FUNCTION ROP(I,FR,CB,XIN)
      DIMENSION FR(1),CB(1),XIN(1)
      ROP=FR(I)*CB(I)/XIN(I)
      END
C----
      FUNCTION CW5(NP,FR,CB,XIN,XI)
      DIMENSION FR(1),CB(1),XIN(1),XI(1)
      CW5=ROP(NP,FR,CB,XIN)*XI(NP)**2/2.
      IF(NP.EQ.1)RETURN
      DO 10 I=1,NP-1
      CW5=CW5-ROP(I,FR,CB,XIN)/2.*(XI(I+1)**2-XI(I)**2)
 10   CONTINUE
      END
C----
      FUNCTION CW6(NP,FR,CB,XIN,XI)
      DIMENSION FR(1),CB(1),XIN(1),XI(1)
      CW6=-ROP(NP,FR,CB,XIN)*XI(NP)
      IF(NP.EQ.1)RETURN
      DO 10 I=1,NP-1
      CW6=CW6+ROP(I,FR,CB,XIN)*(XI(I+1)-XI(I))
 10   CONTINUE
      END
C----
      FUNCTION CW7(NP,FR,CB,XIN)
      DIMENSION FR(1),CB(1),XIN(1)
      CW7=ROP(NP,FR,CB,XIN)/2.
      END
C----
      FUNCTION CW8(NS,FR,CB,XIN,XI)
      DIMENSION FR(1),CB(1),XIN(1),XI(1)
      CW8=0.
      RL1=XI(NS+2)
      DO 10 I=1,NS+1
      AUX=0.
      K=1
      DO 5 J=1,0,-1
      AUX=AUX+K*(RL1*XI(I+J)-XI(I+J)**2/2.)
5     K=-1
      CW8=CW8+ROP(I,FR,CB,XIN)*(AUX-RL1*(XI(I+1)-XI(I)))
 10   CONTINUE
      END
C----
      FUNCTION CW9(NS,FR,CB,XIN,XI)
      DIMENSION FR(1),CB(1),XIN(1),XI(1)
      CW9=0.
      DO 10 I=1,NS+1
      CW9=CW9+ROP(I,FR,CB,XIN)*(XI(I+1)-XI(I))
 10   CONTINUE
      END
C----
      FUNCTION CW4(NS,FR,CB,XIN,XI,RLP)
      DIMENSION FR(1),CB(1),XIN(1),XI(1)
      CW4=-(CW8(NS,FR,CB,XIN,XI)+CW9(NS,FR,CB,XIN,XI)*RLP)
      END
C----
C----     FONCTION PSI
C----
      FUNCTION PSI(AM,AN,M,N,XB,XA,ICOD)
      AUX=0.
      AUX0=XB
```

```
      DO 200 J=1,-1,-2
      IF(ICOD.EQ.2)GO TO 100
      IF(M.EQ.N)GO TO 50
      AUX=AUX+J*(AN*COS(AN*AUX0)*SIN(AM*AUX0)-AM*COS(AM*AUX0)*SIN
     C(AN*AUX0))/(AM*AM-AN*AN)
      GO TO 180
50    AUX=AUX+J*(AUX0/2.-SIN(2.*AM*AUX0)/(4.*AM))
      GO TO 180
 100  IF(M.EQ.N)GO TO 150
      AUX=AUX+J*(AM*COS(AN*AUX0)*SIN(AM*AUX0)-AN*COS(AM*AUX0)*SIN
     C(AN*AUX0))/(AM*AM-AN*AN)
      GO TO 180
 150  AUX=AUX+J*(AUX0/2.+SIN(2.*AM*AUX0)/(4.*AM))
 180  AUX0=XA
200   CONTINUE
      PSI=AUX
      END
C----
C----     FONCTION SINUS HYPERBOLIQUE
      FUNCTION SHP(X)
      SHP=EXP(X)
      SHP=(SHP-1./SHP)/2.
      END
C----
C----     FONCTION COSINUS HYPERBOLIQUE
      FUNCTION CHP(X)
      CHP=EXP(X)
      CHP=(CHP+1./CHP)/2.
      END
C----
C----
      END$
```

```
SCPC3  T=00004 IS ON CR00030 USING 00017 BLKS R=0140

0001          FTN4,B
0002   C----      DATE:  28/ 6/78
0003          PROGRAM CPC3
0004   C*****************************************************************
0005   C*         PROGRAMME POUR LA RESOLUTION DE L'EQUATION            *
0006   C*         (METHODE DE SURRELAXATION).                           *
0007   C*                                                               *
0008   C*****************************************************************
0009          DIMENSION COEF(801),IP(5),IHEUR(5),RBUF(810)
0010          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0011         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0012         C,IWO(6),KNAM(3)
0013          DATA RELAX/1.10/
0014   C----
0015          CALL RMPAR(IP)
0016          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0017   C-----      SORTIE DES COEFFICIENTS DES EQUATIONS
0018          CALL EXEC(11,IHEUR)
0019          LU1=IGO(2)
0020          WRITE(LU1,30)(IHEUR(IJ),IJ=4,2,-1)
0021   30     FORMAT(5/,X"HEURES  :"I5,/X"MINUTES :"I5,/X"SECONDES:"I5,5/)
0022          NN=NNN
0023          NT=4*NN*ITIP
0024   C!!!!  POUR EVITER LA SORTIE DES EQUATIONS
0025          GOTO101
0026   C!!!!
0027    35    IWO(4)=IWO(1)
0028          IWO(5)=0
0029          IWO(6)=0
0030          DO 100 I=1,NT
0031          CALL BWR(1,IWO,COEF,2*(NT+1))
0032          WRITE(LU1,50)I,(COEF(J),J=1,NT+1)
0033   50     FORMAT(/X"EQUATION"I3":"81(/,10E12.4))
0034    100   CONTINUE
0035   C-----      RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS
0036   C----
0037   C----      INITIALISATION DU VECTEUR SOLUTION ET D'AUTRES VARIABLES
0038   C----
0039    101   DO110 I=1,NT
0040    110   COEF(I)=0.
0041   C----
0042          TOLER=1.E-05
0043   C----
0044          CALL EXEC(11,IHEUR)
0045          WRITE(LU1,30)(IHEUR(IJ),IJ=4,2,-1)
0046          WRITE(LU1,120)RELAX
0047    120    FORMAT(5/X"F.RELAXATION INITIAL:"F10.4,3/)
0048          MM=810/(NT+1)
0049   C----      COMMENCEMENT DES ITERATIONS
0050          LL=0
0051          DO 1000 I=1,1000
0052          SUM=0.
0053          SUMD=0.
0054          RV=0.
0055          IWO(4)=IWO(1)
0056          IWO(5)=0
0057          IWO(6)=0
0058          IO=0
0059   C-----      "DO" EQUATIONS
0060          DO800 J=1,NT
0061          IF(MOD(J-1,MM).NE.0)GOTO300
0062   C-----      CHAQUE "MM" EQUATIONS ON LIT LES VALEURS DES COEFFICIENTS
0063   C-----      QUI SONT STOCKEES DANS L'AIRE DU TRAVAIL DU DISQUE
0064          KO=(NT+1)*MIN0(MM,NT-IO)
0065          IO=IO+MM
0066          CALL BWR(1,IWO,RBUF,2*KO)
0067          K=0
0068   C-----      OBTENTION DES RESIDUS
0069   300    FR=RBUF(K+NT+1)
0070          JO=MOD(J-1,NN*4)+1
0071          MO=1
0072          IF(JO.LE.2*NN)MO=2*NN+1
0073          M1=NN-1
0074          IF((JO.LE.NN).OR.((JO.LE.3*NN).AND.(JO.GT.2*NN)))M1=2*NN-1
0075          DO 400 M=1,NT
0076          IF(M.EQ.J)GOTO400
0077          IF(MOD(M-1,4*NN)+1.NE.MO)GOTO310
0078          M=M+M1
```

```
0079          GOTO400
0080   310    FR=FR-RBUF(K+M)*COEF(M)
0081   400    CONTINUE
0082          IF(RBUF(K+J).EQ.0.)STOP3333
0083          DX=FR/RBUF(K+J)-COEF(J)
0084          COEF(J)=COEF(J)+RELAX*DX
0085          SUM=SUM+ABS(DX)
0086          SUMD=SUMD+ABS(COEF(J))
0087          RV=RV+DX*DX
0088          K=K+NT+1
0089   800    CONTINUE
0090          RV=SQRT(RV)
0091          IF(LL.NE.0)GOTO850
0092          LL=1
0093          RL=10000
0094          WRITE(LU1,920)I,RELAX,RV,RL,SUM,SUMD
0095          GOTO 870
0096    850   RL=RV/RV0
0097          WRITE(LU1,920)I,RELAX,RV,RL,SUM,SUMD
0098          IF(RL.GE.1.)GOTO855
0099          IF(ABS(RL-RL0).GT.0.005)GOTO 870
0100          L=L+1
0101          IF(L.NE.3)GOTO 900
0102   855    LL=0
0103          AUX=SQRT(RELAX-1.)
0104          IF(RL.GE.1.)GOTO865
0105          IF(AUX.GE.RL)GOTO 860
0106          RELAX=RELAX+RL-AUX
0107          GOTO 870
0108    860   RELAX=RELAX-0.1*(2.-RELAX)
0109          GOTO870
0110   865    RELAX=AMAX1(RELAX-0.1,1.)
0111    870   L=0
0112   C****
0113          IF(RELAX.GE.2.)STOP224
0114   C****
0115    900   RV0=RV
0116          RL0=RL
0117    920   FORMAT(2/X"I="I4,5X"RELAX="F6.3,3X"RV="E12.4,3X"RL="E12.5,3X
0118         C"SUM="E12.4,3X"SUMD="E12.4)
0119          IF(MOD(I,10).EQ.1)WRITE(LU1,930)(COEF(J),J=1,NT)
0120   930    FORMAT(/,10(8E15.5,/))
0121    990   IF(SUM.LT.SUMD*TOLER)GOTO 1200
0122    1000  CONTINUE
0123          STOP 3334
0124    1200  WRITE(LU1,1210)I,RELAX,SUM,SUMD
0125          WRITE(LU1,930)(COEF(J),J=1,NT)
0126    1210  FORMAT(3/,X"DERNIERE ITERATION:"I5,/,X"FACT.SURRELAX.="F6.3,/,
0127         CX"SUM="E11.4,4X,"SUMD="E11.4)
0128   C----        STOCKAGE DES SOLUTIONS SUR LE FICHIER 'PACO'
0129          IWO(4)=IWO(1)
0130          IWO(5)=0
0131          IWO(6)=0
0132          CALL BWR(2,IWO,COEF,2*4*NN*ITIP)
0133          INAM(2)=2H30
0134          CALL EXEC(11,IHEUR)
0135          WRITE(LU1,30)(IHEUR(IJ),IJ=4,2,-1)
0136          CALL WCOM(INAM,350,IP(1),IP(2),IP(3))
0137          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0138          END
0139          END$
```

```
SCP30  T=00004 IS ON CR00030 USING 00019 BLKS R=0162

0001          FTN4,B
0002   C----      DATE: 13/ 1/78
0003          PROGRAM CP30
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*      PROGRAMME POUR LE STOCKAGE DE LA SOLUTION SUR LE FICHIER  *
0007   C*      'KNAM(3)'                                                 *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION JBUF(1600),IP(5),IDCB(144)
0011          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0012         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0013         C,IWO(6),KNAM(3)
0014   C----
0015          CALL RMPAR(IP)
0016          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0017          IWO(4)=IWO(1)
0018          IWO(5)=0
0019          IWO(6)=0
0020          NN=2*4*ITIP*NNN
0021          CALL BWR(1,IWO,JBUF,NN)
0022          CALL OPEN(IDCB,IERR,KNAM)
0023   C****
0024          IF(IERR.NE.1)STOP225
0025   C****
0026          CALL WRITF(IDCB,IERR,JBUF,NN,1)
0027   C****
0028          IF(IERR.NE.0)STOP226
0029   C****
0030          CALL CLOSE(IDCB)
0031          CALL EXEC(16,IWO(2)-IWO(1)+1,IWO(1),2)
0032          END
0033          END$
```

```
SCPC4  T=00004 IS ON CR00020 USING 00015 BLKS R=0123

0001          FTN4,B
0002   C----       DATE:  24/ 2/78
0003           PROGRAM CPC4
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*          SEGMENT POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES(ZONE SANS BOSSAGE)  *
0007   C*                                                               *
0008   C*****************************************************************
0009           DIMENSION RBUF(800),JBUF(1664),IWO1(6),MBUF(186)
0010          C,TN(3,30),KBUF(180),IP(5),IDCB(144),VBUF(6)
0011           COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0012          CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0013          C,IWO(6),KNAM(3)
0014           EQUIVALENCE (JBUF,RBUF),(TN,KBUF)
0015          C,(MBUF,I),(MBUF(2),NN),(MBUF(3),IZ),(MBUF(4),IT),(MBUF(5),IC)
0016          C,(MBUF(6),IV),(MBUF(7),K3UF)
0017   C----
0018           FA(GN,RNU)=2.*(CLN(GN)*CHP(GN)+CKN(GN)*SHP(GN))-(1.+RNU)
0019   C----
0020           FC(GN)=2.*(CKN(GN)*CHP(GN)+CLN(GN)*SHP(GN))
0021   C----
0022   C----
0023   C----       LECTURE RESULTATS EQUATION DES LE FICHIER 'PACO'
0024           CALL RMPAR(IP)
0025           CALL RCOM(INAM,330,IP(1),IP(2),IP(3))
0026           IWO1(1)=IWO(1)
0027           IWO1(2)=IWO(2)
0028           IWO1(3)=IWO(3)
0029           IF(IP(4).EQ.0)GOTO40
0030    30     IWO1(4)=IWO1(2)
0031           IWO1(5)=0
0032           IWO1(6)=0
0033           CALL BWR(1,IWO1,MBUF,186)
0034           CALL BWR(1,IWO1,JBUF,8*NN*ITIP)
0035           GOTO800
0036   40      NN=NNN
0037           CALL OPEN(IDCB,IERR,KNAM)
0038   C****
0039           IF(IERR.NE.1)STOP 231
0040   C****
0041           CALL READF(IDCB,IERR,JBUF,8*NN*ITIP,LEN,1)
0042   C****
0043           IF(IERR.NE.0)STOP 232
0044   C****
0045           CALL CLOSE(IDCB)
0046           IWO1(4)=IWO1(2)
0047           IWO1(5)=2
0048           IWO1(6)=58
0049           CALL BWR(2,IWO1,JBUF,8*NN*ITIP)
0050           IWO(4)=IWO(1)
0051           IWO(5)=0
0052           IWO(6)=0
0053   C----       LECTURE DONNEES DES CONTRAINTES DESIREES
0054           I=0
0055   50      I=I+1
0056           IT=LBUF(2*I-1)/1000
0057           IC=MOD(LBUF(2*I-1),1000)/10
0058           IZ=MOD(LBUF(2*I-1),10)
0059           IF((MOD(IZ,2).EQ.0).AND.(IZ.LT.6))IZ=-IZ
0060           IV=LBUF(2*I)
0061           MP=21
0062           IF(IC.NE.1)MP=30
0063           DO 60 J=1,30
0064           DO 60 K=1,3
0065   60      TN(K,J)=0.
0066           IF(IZ)5000,9900,100
0067    100    B0=BB(IZ)
0068   C----
0069   C----       CONTRAINTES DANS LES ZONES INTERBOSSAGES
0070   C----
0071   C----       EFFORTS NORMAL ET TRANCHANT
0072    102    DO 1000 J=1,2
0073           DO 800 N=1,NN
0074           AN=PI/(2.*RLP)*(2*N-1)
0075           GN=AN*B0
0076           IF(IZ.LT.6)GOTO109
0077           GNN=AN*BB(1)
0078           DO 1=FB(GN)
```

```
0079          IF(BB(7).LT.1.)GOTO108
0080          ASSIGN 108 TO ILB
0081          EC=FE(AN*BB(6))
0082          GOTO151
0083    108   AUX=(FB(GNN)*RBUF(N)-FF(GNN)*RBUF(NN+N))/(FE(GNN)+AUX1)
0084          AUX0=0.
0085          IF(BB(7).LT.1.)GOTO107
0086          IF(J.EQ.2)GOTO105
0087          AUX=-AUX*(ED*(AC-AD)+AD*(EC+ED))/AUX3
0088          AUX0=0.
0089          IF(IZ.EQ.6)GOTO120
0090          AUX0=AUX
0091          AUX=0.
0092          GOTO120
0093    105   AUX2=BE*ED+(AC-AD)*AD
0094          IF(IZ.EQ.7)AUX2=BE*EC-(AC-AD)*AC
0095          AUX=AUX*AUX2/AUX3
0096          AUX0=0.
0097          IF(IZ.EQ.6)GOTO155
0098          AUX0=-AUX
0099          AUX=0.
0100          GOTO155
0101    107   J=2
0102          GOTO155
0103    109   IF(J.EQ.2)GO TO 130
0104    110   AUX=RBUF(4*NN*(MINO(ITIP,IZ)-1)+N)
0105          AUX0=0.
0106          IF(IZ.NE.1)AUX0=RBUF(4*NN*(IZ-2)+N)
0107    120   RI=(AUX+AUX0)/(AN*AN)*CIN(GN)
0108          RL=(AUX+AUX0)/AN*CLN(GN)
0109          RJ=(AUX-AUX0)/(AN*AN)*CJN(GN)
0110          RKK=(AUX-AUX0)/AN*CKN(GN)
0111          GO TO 180
0112    130   IF(IZ.GT.ITIP)GO TO 140
0113          AUX=RBUF(4*NN*(IZ-1)+NN+N)
0114          GO TO 145
0115    140   AUX=-RBUF(4*NN*(ITIP-1)+NN+N)
0116    145   IF(IZ.EQ.1)GO TO 150
0117          AUX0=RBUF(4*NN*(IZ-2)+NN+N)
0118          GO TO 155
0119    150   AUX1=FE(BB(6)*AN)
0120          IF(BB(7).LT.1.)GOTO154
0121          ASSIGN154 TO ILB
0122          EC=AUX1
0123    151   AUX1=AN*BB(6)
0124          AUX2=AN*BB(7)
0125          ED=FE(AUX2)
0126          AC=FA(AUX1,RNU)
0127          AD=FA(AUX2,RNU)
0128          BE=FC(AUX1)+FC(AUX2)
0129          AUX3=BE*(EC+ED)-(AC-AD)**2
0130          AUX1=(2C*EC*ED-EC*AD*AD-ED*AC*AC)/AUX3
0131          GOTOILB
0132    154   AUX0=(FB(GN)*RBUF(N)-FF(GN)*RBUF(NN+N))/(FE(GN)+AUX1)
0133  C$$$
0134  C$$$  AUX0=0.(BORDS LIBRES).
0135  C$$$
0136    155   RI=(AUX-AUX0)/(AN*AN)*CIT(GN)
0137          RJ=(AUX+AUX0)/(AN*AN)*CJT(GN)
0138          RL=(AUX-AUX0)/AN*CLT(GN)
0139          RKK=(AUX+AUX0)/AN*CKT(GN)
0140    180   DO 300 K=1,MP
0141          IF(IC.NE.1) GO TO 190
0142          AUX=IV
0143          AUX0=S0*(0.1*K-1.1)
0144          GO TO 200
0145    190   AUX0=IV
0146          AUX=RLP/29.*(K-1)
0147          M=MOD(IC,10)
0148          IF(M.EQ.0)GOTO200
0149          AUX=XI(M,2)/5.*(K-1)
0150          IF(K.GT.5)AUX=XI(M,2)*(1.-(10.-K)/25.)
0151          IF(K.GT.10)AUX=(XI(M,K-9)+XI(M,K-8))/2.
0152          IF(K.GE.21)AUX=XI(M,NS+2)+(RLP-XI(M,NS+2))/25.*(K-21)
0153          IF(K.GT.26)AUX=XI(M,NS+2)+(RLP-XI(M,NS+2))/5.*(K-25)
0154  200     AUX1=AN*AUX0
0155          IL=(IT-2)/(-0.1)
0156          IL=(IL+1)/(-0.1)
0157          GO TO (210,220,230),IT
0158  210     IT=1
```

```
0159   215    AUX=COS(AN*AUX)*AN*AN*(RI*CH+RJ*SH
0160         C+RKK*(2./AN*SH*M+AUX0*CH)+RL*(2./AN*CH*M
0161         C+AUX0*SH))*(3-2*IT)
0162          GO TO 240
0163   220    M=0
0164           GO TO 215
0165   230    AUX=SIN(AN*AUX)*AN*AN*(RI*SH+RJ*CH
0166         C+RKK*(CH/AN+AUX0*SH)+RL*(SH/AN+AUX0*CH))
0167   240    TN(1,K)=TN(1,K)+AUX
0168          TN(2,K)=TN(2,K)+AUX
0169          TN(3,K)=TN(3,K)+AUX
0170   300    CONTINUE
0171   800    CONTINUE
0172   1000   CONTINUE
0173          INAM(2)=2H40
0174          GOTO5010
0175   C----
0176   C----      CONTRAINTES DANS LES ZONES AVEC BOSSAGE
0177   C----
0178   5000   INAM(2)=2H41
0179   5010   IWO1(4)=IWO1(2)
0180          IWO1(5)=0
0181          IWO1(6)=0
0182          CALL BWR(2,IWO1,MBUF,136)
0183          GOTO9999
0184   8000   IF(I.LT.50)GOTO50
0185   C----  ECRITURE SUR LE FICHIER 'PACO'
0186          I=51
0187   9900   I=I-1
0188          IWO(4)=IWO(1)
0189          IWO(5)=0
0190          IWO(6)=0
0191          I=I*180
0192          K=1
0193          CALL OPEN(IDCB,IERR,KNAM)
0194   C****
0195          IF(IERR.NE.1)STOP233
0196   C****
0197   9902   L=MIN0(I,1664)
0198           CALL BWR(1,IWO,JBUF,L)
0199          CALL WRITF(IDCB,IERR,JBUF,L,K)
0200   C****
0201          IF(IERR.NE.0)STOP234
0202   C****
0203          K=K+13
0204          I=I-L
0205          IF(I.GT.0)GOTO9902
0206          CALL CLOSE(IDCB)
0207          CALL EXEC(16,IWO(2)-IWO(1)+1,IWO(1),2)
0208          GOTO 9998
0209   9998   CALL WCOM(INAM,330,IP(1),IP(2),IP(3))
0210          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0211   9998   END
0212   C----
0213   C----
0214   C----
0215   C----
0216   C----      FONCTION SINUS HYPERBOLIQUE
0217          FUNCTION SHP(X)
0218          SHP=EXP(X)
0219          SHP=(SHP-1./SHP)/2.
0220          END
0221   C----
0222   C----      FONCTION COSINUS HYPERBOLIQUE
0223          FUNCTION CHP(X)
0224          CHP=EXP(X)
0225          CHP=(CHP+1./CHP)/2.
0226          END
0227   C----
0228   C----      FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT NORMAL
0229   C----
0230          FUNCTION CIN(GN)
0231          CIN=-(SHP(GN)+GN*CHP(GN))/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0232          END
0233   C----
0234          FUNCTION CLN(GN)
0235          CLN=SHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0236          END
0237   C----
0238          FUNCTION CJN(GN)
```

```
0239          CJN=-(CHP(GN)+GN*SHP(GN))/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0240          END
0241    C----
0242          FUNCTION CKN(GN)
0243          CKN=CHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0244          END
0245    C----
0246    C----     FONCTIONS E,F(E.TRANCHANT)
0247    C----
0248          FUNCTION FE(GN)
0249          FE=2.*(CKT(GN)*SHP(GN)+CLT(GN)*CHP(GN))
0250          END
0251    C----
0252          FUNCTION FF(GN)
0253          FF=2.*(CKT(GN)*SHP(GN)-CLT(GN)*CHP(GN))
0254          END
0255    C----
0256    C----
0257    C----     FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT TRANCHANT
0258    C----
0259          FUNCTION CIT(GN)
0260          CIT=-GN*SHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0261          END
0262    C----
0263          FUNCTION CJT(GN)
0264          CJT=-GN*CHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0265          END
0266    C----
0267          FUNCTION CKT(GN)
0268          CKT=SHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0269          END
0270    C----
0271          FUNCTION CLT(GN)
0272          CLT=CHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0273          END
0274    C----
0275    C----     FONCTION FB(EFFORT NORMAL)
0276    C----
0277          FUNCTION FB(GN)
0278          FB=2.*(CLN(GN)*CHP(GN)-CKN(GN)*SHP(GN))
0279          END
0280          END$
```

```
SCP40  T=00004 IS ON CR00020 USING 00013 BLKS R=0102

0001          FTN4,B
0002   C----       DATE: 14/ 2/78
0003          PROGRAM CP40
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*    SEGMENT POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES(ZONE SANS BOSSAGE-BIS)  *
0007   C*                                                               *
0008   C*****************************************************************
0009          DIMENSION RBUF(800),JBUF(1600),IW01(6),MBUF(186)
0010         C,TN(3,30),KBUF(180),IP(5),VBUF(6)
0011          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0012         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0013         C,IWO(6),KNAM(3)
0014          EQUIVALENCE (JBUF,RBUF),(TN,KBUF)
0015         C,(MBUF,I),(MBUF(2),NN),(MBUF(3),IZ),(MBUF(4),IT),(MBUF(5),IC)
0016         C,(MBUF(6),IV),(MBUF(7),KBUF)
0017   C----
0018   C----
0019          CALL RMPAR(IP)
0020          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0021          IW01(1)=IWO(1)
0022          IW01(2)=IWO(2)
0023          IW01(3)=IWO(3)
0024          IP(4)=1
0025          IW01(4)=IW01(2)
0026          IW01(5)=0
0027          IW01(6)=0
0028          CALL BWR(1,IW01,MBUF,186)
0029          CALL BWR(1,IW01,JBUF,8*NN*ITIP)
0030   C----
0031   C----      EFFORTS FLEXION ET VERTICAL
0032   C----
0033          IF(IZ.GE.6)GOTO7000
0034          B0=BB(IZ)
0035          D=EL*ESP**3/(12.*(1.-RNU**2))
0036          MP=21
0037          IF(IC.NE.1)MP=30
0038           DO 2000 J=1,2
0039           DO 1800 N=1,NN
0040          AN=PI/(2.*RLP)*(2*N-1)
0041          GN=AN*B0
0042          IF(J.EQ.2)GO TO 1050
0043   1010   AUX=RBUF(4*NN*(MIN0(IZ,ITIP)-1)+2*NN+N)
0044   1020   IF(IZ.EQ.1)GO TO 1030
0045          AUX0=RBUF(4*NN*(IZ-2)+2*NN+N)
0046          GO TO 1040
0047   1030   AUX0=CN1(AN,GN,RNU)*RBUF(2*NN+N)+CN3(AN,GN,RNU)*RBUF(3*NN+N)
0048   C$$$$
0049   C$$$$  AUX0=0.(BORDS LIBRES).
0050   C$$$$
0051   1040   AUX1=2.*D*(1.-RNU)*AN
0052          RI=(AUX+AUX0)/(AUX1*AN)*CIM(GN,RNU)
0053          RJ=(AUX-AUX0)/(AUX1*AN)*CJM(GN,RNU)
0054          RKK=(AUX-AUX0)/AUX1*CKM(GN,RNU)
0055          RL=(AUX+AUX0)/AUX1*CLM(GN,RNU)
0056          GO TO 1200
0057   1050   IF(IZ.GT.ITIP)GO TO 1060
0058          AUX=RBUF(4*NN*(IZ-1)+3*NN+N)
0059          GO TO 1070
0060   1060   AUX=-RBUF(4*NN*(ITIP-1)+3*NN+N)
0061   1070   IF(IZ.EQ.1)GO TO 1080
0062          AUX0=RBUF(4*NN*(IZ-2)+3*NN+N)
0063           GO TO 1100
0064   1080   AUX0=CN2(AN,GN,RNU)*RBUF(2*NN+N)+CN4(AN,GN,RNU)*RBUF(3*NN+N)
0065   C$$$$
0066   C$$$$  AUX0=0.(BORDS LIBRES).
0067   C$$$$
0068   1100   AUX1=2.*D*(1.-RNU)*AN*AN
0069          RI=(AUX-AUX0)/(AUX1*AN)*CIV(GN,RNU)
0070          RJ=(AUX+AUX0)/(AUX1*AN)*CJV(GN,RNU)
0071          RKK=(AUX+AUX0)/AUX1*CKV(GN,RNU)
0072          RL=(AUX-AUX0)/AUX1*CLV(GN,RNU)
0073   1200   DO 1500 K=1,MP
0074          IF(IC.NE.1)GO TO 1220
0075          AUX=IV
0076          AUX0=B0*(0.1*K-1.1)
0077          GO TO 1230
0078   1220   AUX0=IV
```

```
0079          AUX=RLP/29.*(K-1)
0080          M=MOD(IC,10)
0081          IF(M.EQ.0)GOTO1230
0082          AUX=XI(M,2)/5.*(K-1)
0083          IF(K.GT.5)AUX=XI(M,2)*(1.-(10.-K)/25.)
0084          IF(K.GT.10)AUX=(XI(M,K-9)+XI(M,K-8))/2.
0085          IF(K.GE.21)AUX=XI(M,NS+2)+(RLP-XI(M,NS+2))/25.*(K-21)
0086          IF(K.GT.26)AUX=XI(M,NS+2)+(RLP-XI(M,NS+2))/5.*(K-25)
0087    1230  AUX1=AN*AUX0
0088          AUX2=1.-RNU
0089          CH=CHP(AUX1)
0090          SH=SHP(AUX1)
0091          GO TO(1240,1250,1260),IT
0092    1240  AUX3=-RNU
0093    1245  AUX=D*AN*AN*COS(AN*AUX)*(AUX2*(RI*CH+RJ*SH+RKK*AUX0
0094         C*CH+RL*AUX0*SH)+2.*AUX3/AN*(RKK*SH+RL*CH
0095         C))*(3-2*IT)
0096          GO TO 1280
0097    1250  AUX3=1.
0098          GO TO 1245
0099    1260  AUX=D*AUX2*AN*AN*SIN(AN*AUX)*(RI*SH+RJ*CH
0100         C+RKK*(AUX0*SH+CH/AN)+RL*(AUX0*CH+
0101         CSH/AN))
0102    1280  AUX=AUX*12./ESP**3
0103    1290  TN(1,K)=TN(1,K)-AUX*ESP/2.
0104          TN(3,K)=TN(3,K)+AUX*ESP/2.
0105    1500  CONTINUE
0106    1800  CONTINUE
0107   2000   CONTINUE
0108   C----
0109   C----      STOCKAGE DES CONTRAINTES DANS L'AIRE DU TRAVAIL
0110   C----
0111   7000   CALL BWR(2,IWO,KBUF,180)
0112          INAM(2)=2HC4
0113          IWO1(4)=IWO1(2)
0114          IWO1(5)=0
0115          IWO1(6)=0
0116          CALL BWR(2,IWO1,MBUF,186)
0117   9999   CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0118          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0119          END
0120   C----
0121   C----
0122   C----
0123   C----      FONCTION SINUS HYPERBOLIQUE
0124          FUNCTION SHP(X)
0125          SHP=EXP(X)
0126          SHP=(SHP-1./SHP)/2.
0127          END
0128   C----
0129   C----      FONCTION COSINUS HYPERBOLIQUE
0130          FUNCTION CHP(X)
0131          CHP=EXP(X)
0132          CHP=(CHP+1./CHP)/2.
0133          END
0134   C----
0135   C----      FONCTIONS CN DANS L'ENCASTREMENT
0136   C----
0137          FUNCTION CN0(AM,GMA,RNU)
0138          CN0=-(-FM(GMA,RNU)*FM(GMA,RNU)/4.+FQ(GMA,RNU)*FO
0139         C(GMA,RNU)/((1.-RNU)*(1.-RNU)))/AM
0140          END
0141   C----
0142          FUNCTION CN2(AM,GMA,RNU)
0143          CN2=(FO(GMA,RNU)*FN(GMA,RNU)-FP(GMA,RNU)*FM
0144         C(GMA,RNU))/(2.*(1.-RNU)*CN0(AM,GMA,RNU))
0145          END
0146   C----
0147          FUNCTION CN1(AM,GMA,RNU)
0148          CN1=(-FN(GMA,RNU)*FM(GMA,RNU)/4.+FP(GMA,RNU)*FQ
0149         C(GMA,RNU)/((1.-RNU)*(1.-RNU)))/(CN0(AM,GMA,RNU)*AM)
0150          END
0151   C----
0152          FUNCTION CN3(AM,GMA,RNU)
0153          CN3=(-FN(GMA,RNU)*FQ(GMA,RNU)-FR(GMA,RNU)*FM
0154         C(GMA,RNU))/(2.*AM*AM*(1.-RNU)*CN0(AM,GMA,RNU))
0155          END
0156   C----
0157          FUNCTION CN4(AM,GMA,RNU)
0158          CN4=(FN(GMA,RNU)*FM(GMA,RNU)/4.+FO(GMA,RNU)*FR
```

ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES BIBLIOTHÈQUE

```
      C(GMA,RNU)/((1.-RNU)*(1.-RNU)))/(CNO(AM,GMA,RNU)*AM)
       END
C----
C----
C----      FONCTIONS Q,R,S,T(E,VERTICAL);IN,JN,KN,LN(FLEXION)
C----
       FUNCTION CIV(GN,RNU)
       CIV=((1.-RNU)*GN*SHP(GN)+2.*CHP(GN))/((3.+RNU)/2.*SHP
      C(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
       END
C----
       FUNCTION CJV(GN,RNU)
       CJV=((1.-RNU)*GN*CHP(GN)+2.*SHP(GN))/((3.+RNU)/2.*SHP
      C(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
       END
C----
       FUNCTION CKV(GN,RNU)
       CKV=-(1.-RNU)*SHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)+(1.-RNU
      C)*GN)
       END
C----
       FUNCTION CLV(GN,RNU)
       CLV=-(1.-RNU)*CHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)-(1.-RNU
      C)*GN)
       END
C----
       FUNCTION FQ(GN,RNU)
       FQ=CLV(GN,RNU)*CHP(GN)+CKV(GN,RNU)*SHP(GN)
       END
C----
       FUNCTION FR(GN,RNU)
       FR=-CLV(GN,RNU)*CHP(GN)+CKV(GN,RNU)*SHP(GN)
       END
C----   FONCTION FS=-FM        FONCTION FT=FN
C----
C----
C----
C----      FONCTIONS M,N,O,P(MOMENT FLECHISSANT);IN,JN,KN,LN(FLEXION)
C----
       FUNCTION CIM(GN,RNU)
       CIM=((1.-RNU)*GN*CHP(GN)-(1.+RNU)*SHP(GN))/((3.+RNU)/2.*
      CSHP(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
       END
C----
       FUNCTION CJM(GN,RNU)
       CJM=((1.-RNU)*GN*SHP(GN)-(1.+RNU)*CHP(GN))/((3.+RNU)/2.*
      CSHP(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
       END
C----
       FUNCTION CKM(GN,RNU)
       CKM=-(1.-RNU)*CHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
       END
C----
       FUNCTION CLM(GN,RNU)
       CLM=-(1.-RNU)*SHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
       END
C----
       FUNCTION FM(GN,RNU)
       FM=(CIM(GN,RNU)+CKM(GN,RNU)*GN)*CHP(GN)+(CJM(GN,RNU)+CLM
      C(GN,RNU)*GN)*SHP(GN)
       END
C----
       FUNCTION FN(GN,RNU)
       FN=(CIM(GN,RNU)-CKM(GN,RNU)*GN)*CHP(GN)-(CJM(GN,RNU)-CLM
      C(GN,RNU)*GN)*SHP(GN)
       END
C----
       FUNCTION FO(GN,RNU)
       FO=CLM(GN,RNU)*SHP(GN)+CKM(GN,RNU)*CHP(GN)
       END
C----
       FUNCTION FP(GN,RNU)
       FP=CLM(GN,RNU)*SHP(GN)-CKM(GN,RNU)*CHP(GN)
       END
       END$
```

```
SCP41  T=00004 IS ON CR00020 USING 00018 BLKS R=0133

0001          FTN4,B
0002   C----      DATE:  14/ 2/78
0003          PROGRAM CP41
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*          SEGMENT POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES(BOSSAGE)      *
0007   C*                                                               *
0008   C*****************************************************************
0009          DIMENSION RBUF(800),JBUF(1600),IW01(6),MBUF(186),XJ(16)
0010         C,TN(3,30),TXZ(90),KBUF(180),IP(5)
0011          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0012         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0013         C,IWO(6),KNAM(3)
0014          EQUIVALENCE (JBUF,RBUF),(TN,KBUF),(TXZ,KBUF)
0015         C,(MBUF,I),(MBUF(2),NN),(MBUF(3),IZ),(MBUF(4),IT),(MBUF(5),IC)
0016         C,(MBUF(6),IY),(MBUF(7),KBUF),(LU1,IGO(2))
0017   C----
0018   C----
0019          CALL RMPAR(IP)
0020          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0021   C----
0022   C----      CONTRAINTES DANS LES ZONES AVEC BOSSAGE
0023   C----
0024          IW01(1)=IWO(1)
0025          IW01(2)=IWO(2)
0026          IW01(3)=IWO(3)
0027          IP(4)=1
0028          IW01(4)=IW01(2)
0029          IW01(5)=0
0030          IW01(6)=0
0031          CALL BWR(1,IW01,MBUF,186)
0032          CALL BWR(1,IW01,JBUF,8*NN*ITIP)
0033   5000   BO=BB(-IZ)
0034          IZ=-IZ
0035           DO 5005 J=1,NS+3
0036   5005   XJ(J)=XI(IZ/2,J)
0037          NP=5
0038          IF(IC.EQ.2)MP=30
0039          DO 6209 K=1,MP
0040          YY=IY
0041          IF(IC.EQ.1)YY=BO*(0.5*K-1.5)
0042          XX=IY+0.000001
0043          IF(IC.EQ.1)GOTO5007
0044          XX=XJ(2)/5.*(K-1)
0045          IF(K.GT.5)XX=XJ(2)*(1.-(10.-K)/25.)
0046          IF(K.EQ.1)XX=0.000001
0047          IF(K.EQ.10)XX=XX-0.001
0048          IF(K.GT.10)XX=(XJ(K-9)+XJ(K-8))/2.
0049          IF(K.GE.21)XX=XJ(NS+2)+(RLP-XJ(NS+2))/25.*(K-21)
0050          IF(K.EQ.21)XX=XX+0.001
0051          IF(K.GT.26)XX=XJ(NS+2)+(RLP-XJ(NS+2))/5.*(K-25)
0052   5007   DO 5010 J=NS+2,1,-1
0053          IF(XX.GT.XJ(J))GO TO 5020
0054   5010   CONTINUE
0055   C****
0056          STOP 7700
0057   C****
0058   5020   NP=J
0059   C----      ETUDE POUTRE(PRECONTRAINTE-A;CHARGES VERTICALES;TRANCHANT)
0060          IF(IT.EQ.3)GO TO 5205
0061          AUX3=0.
0062          AUX4=0.
0063          DO 5100 N=1,NN
0064          IF((NP.LT.2).OR.(NP.EQ.NS+2).OR.(IT.EQ.2))GOTO5100
0065          AN=PI/(2.*RLP)*(2*N-1)
0066          AUX1=RBUF(4*NN*(IZ-1)+3*NN+N)
0067          IF(IZ.GT.ITIP)AUX1=-RBUF(4*NN*(ITIP-1)+3*NN+N)
0068          AUX1=AUX1-RBUF(4*NN*(IZ-2)+3*NN+N)
0069          AUX4=AUX4+AUX1*COS(AN*XX)/(AN*AN)
0070          AUX1=RBUF(4*NN*(IZ-1)+NN+N)
0071          IF(IZ.GT.ITIP)AUX1=-RBUF(4*NN*(ITIP-1)+NN+N)
0072          AUX1=AUX1-RBUF(4*NN*(IZ-2)+NN+N)
0073          AUX3=AUX3+AUX1*COS(AN*XX)/AN*ESP
0074   5100   CONTINUE
0075          AUX2=AUX3*(HI(NP)-ESP)/2.
0076          DO 5200 J=1,3
0077          M=0
0078          IF(IT.EQ.2)M=2
```

```
0079          Z=ESP*(3-M)/2.
0080          AFF=FRI(NP)
0081    5190  AUXO=-FPT*CB(NP)/(HI(NP)*2.*BO)*(1.-12.*AFF/HI(NP)*(0.5-
0082         CZ/HI(NP)))
0083          IF(IT.EQ.2)AUXO=AUXO*RNU
0084          IF(NP.EQ.NS+2)AUXO=0.
0085          AUXO=AUXO+(AUX2+AUX4)*(HI(NP)/2.-Z)/(2.*BO/12.*HI(NP)**3)
0086         C+AUX3/(2.*BO*HI(NP))
0087          TN(J,K)=AUXO
0088    5200  CONTINUE
0089          GOTO6209
0090    C----      CONTRAINTES DE TORSION
0091    5205  DO6200 N=1,NN
0092          AN=PI/(2.*RLP)*(2*N-1)
0093          AUX=RBUF(4*NN*(IZ-1)+3*NN+N)
0094          IF(IZ.GT.ITIP)AUX=-RBUF(4*NN*(ITIP-1)+3*NN+N)
0095          AUXO=RBUF(4*NN*(MINO(IZ,ITIP)-1)+2*NN+N)
0096          AUX=-(BO*(AUX+RBUF(4*NN*(IZ-2)+3*NN+N))+(RBUF(4*NN*(IZ-2)+2*NN+N)
0097         C-AUXO))*SIN(AN*XX)/AN
0098          IF((NP.LT.2).OR.(NP.EQ.NS+2))GO TO 5410
0099          AUXO=AMAX1(2.*BO,HI(NP))
0100          AUXO=AUXO/AMIN1(2.*BO,HI(NP))
0101          AUXO=-AUX*2./(HI(NP)*2.*BO*HI(NP)**2/(3.+1.8/AUXO))
0102          TN(1,K)=TN(1,K)+AUXO*(HI(NP)/2.-ESP)
0103          TN(2,K)=TN(2,K)+AUXO*(HI(NP)/2.-ESP/2.)
0104          TN(3,K)=TN(3,K)+AUXO*HI(NP)/2.
0105          GO TO 6200
0106    5410  AUXO=12.*AUX/(2.*BO*ESP**3)*ESP/2.
0107          TN(1,K)=TN(1,K)+AUXO
0108          TN(3,K)=TN(3,K)-AUXO
0109    6200  CONTINUE
0110    6209  CONTINUE
0111          INAM(2)=2H42
0112    C----
0113    C----      CHANGEMENT DE PROGRAMME
0114    C----
0115          IWO1(4)=IWO1(2)
0116          IWO1(5)=0
0117          IWO1(6)=0
0118          CALL BWR(2,IWO1,MBUF,186)
0119    9999  CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0120          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0121          END
0122          END$
```

```
SCP42  T=00004 IS ON CR00020 USING 00019 BLKS R=0150

0001          FTN4,B
0002   C----      DATE: 14/ 2/78
0003          PROGRAM CP42
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*          SEGMENT POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES(BOSSAGE-BIS)  *
0007   C*                                                               *
0008   C*****************************************************************
0009          DIMENSION RBUF(800),JBUF(1600),IW01(6),MBUF(186),XJ(16)
0010         C,TN(3,30),KBUF(130),IP(5),VBUF(6)
0011          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0012         CPI,RNU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0013         C,IWO(6),KNAM(3)
0014          EQUIVALENCE (JBUF,RBUF),(TN,KBUF)
0015         C,(MBUF,I),(MBUF(2),NN),(MBUF(3),IZ),(MBUF(4),IT),(MBUF(5),IC)
0016         C,(MBUF(6),IY),(MBUF(7),KBUF)
0017   C----
0018   C----
0019          CALL RMPAR(IP)
0020          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0021   C----
0022   C----      CONTRAINTES DANS LES ZONES AVEC BOSSAGE
0023   C----
0024          IW01(1)=IWO(1)
0025          IW01(2)=IWO(2)
0026          IW01(3)=IWO(3)
0027          IP(4)=1
0028          IW01(4)=IW01(2)
0029          IW01(5)=0
0030          IW01(6)=0
0031          CALL BWR(1,IW01,MBUF,186)
0032          CALL BWR(1,IW01,JBUF,8*NN*ITIP)
0033   5000   B0=BB(IZ)
0034          D=EL*ESP**3/(12.*(1.-RNU**2))
0035           DO 5005 J=1,NS+3
0036   5005   XJ(J)=XI(IZ/2,J)
0037          MP=5
0038          IF(IC.EQ.2)MP=30
0039          DO 6209 K=1,MP
0040          YY=IY
0041          IF(IC.EQ.1)YY=B0*(0.5*K-1.5)
0042          XX=IY+0.000001
0043          IF(IC.EQ.1)GOTO5007
0044          XX=XJ(2)/5.*(K-1)
0045          IF(K.GT.5)XX=XJ(2)*(1.-(10.-K)/25.)
0046          IF(K.EQ.1)XX=0.000001
0047          IF(K.EQ.10)XX=XX-0.001
0048          IF(K.GT.10)XX=(XJ(K-9)+XJ(K-8))/2.
0049          IF(K.GE.21)XX=XJ(NS+2)+(RLP-XJ(NS+2))/25.*(K-21)
0050          IF(K.EQ.21)XX=XX+0.001
0051          IF(K.GT.26)XX=XJ(NS+2)+(RLP-XJ(NS+2))/5.*(K-25)
0052   5007   DO 5010 J=NS+2,1,-1
0053          IF(XX.GT.XJ(J))GO TO 5020
0054   5010   CONTINUE
0055   C****
0056          STOP 7702
0057   C****
0058   5020   MP=J
0059   C----      ETUDE PLAQUE(PRECONTRAINT-B;MOMENT;NORMAL;TRANCHANT;VERTICAL)
0060   5210   DO 6200 N=1,NN
0061          AN=PI/(2.*RLP)*(2*N-1)
0062          GN=AN*B0
0063          IO=1
0064   5214   CRED=RK(1,NP)
0065          IF(IT.NE.2)CRED=(CRED+RK(2,NP))/2.
0066   5215   GO TO(110,130,120)IO
0067    110   AUX=RBUF(4*NN*(MIN0(ITIP,IZ)-1)+N)
0068          AUXO=RBUF(4*NN*(IZ-2)+N)
0069    120   RI=(AUX+AUXO)/(AN*NN)*CIN(GN)
0070          RL=(AUX+AUXO)/AN*CLN(GN)
0071          RJ=(AUX-AUXO)/(AN*AN)*CJN(GN)
0072          RKK=(AUX-AUXO)/AN*CKN(GN)
0073          GOTO5220
0074    130   IF(IZ.GT.ITIP)GO TO 140
0075          AUX=RBUF(4*NN*(IZ-1)+NN+N)
0076          GO TO 145
0077    140   AUX=-RBUF(4*NN*(ITIP-1)+NN+N)
0078    145   AUXO=RBUF(4*NN*(IZ-2)+NN+N)
```

```
0079          IF((IT.NE.1).OR.(NP.LT.2).OR.(NP.EQ.NS+2))GOTO146
0080          AUX=(AUX+AUX0)/2.
0081          AUX0=AUX
0082    146   RI=(AUX-AUX0)/(AN*AN)*CIT(GN)
0083          RJ=(AUX+AUX0)/(AN*AN)*CJT(GN)
0084          RL=(AUX-AUX0)/AN*CLT(GN)
0085          RKK=(AUX+AUX0)/AN*CKT(GN)
0086   5220   AUX=XX
0087          AUX0=YY
0088          AUX1=AN*AUX0
0089          CH=CHP(AUX1)
0090          SH=SHP(AUX1)
0091          GO TO (210,220,230),IT
0092   210    M=1
0093   215    AUX=COS(AN*AUX)*AN*AN*(RI*CH+RJ*SH
0094         C+RKK*(2./AN*SH*M+AUX0*CH)+RL*(2./AN*CH*M
0095         C+AUX0*SH))*(3-2*IT)
0096          GO TO 5230
0097   220    M=0
0098           GO TO 215
0099   230    AUX=SIN(AN*AUX)*AN*AN*(RI*SH+RJ*CH
0100         C+RKK*(CH/AN+AUX0*SH)+RL*(SH/AN+AUX0*CH))
0101   5230   AUX=AUX*CRED
0102          TN(1,K)=TN(1,K)+AUX
0103          TN(2,K)=TN(2,K)+AUX
0104          TN(3,K)=TN(3,K)+AUX
0105          GO TO(5231,5300,6200),IO
0106    5231  AUX=RBUF(4*NN*(MIN0(IZ,ITIP)-1)+2*NN+N)
0107          AUX0=RBUF(4*NN*(IZ-2)+2*NN+N)
0108          I1=1
0109          CRED=RK(3,NP)
0110          IF(IT.NE.2)CRED=(CRED+(ESP/HI(NP))**3)/2.
0111          IF(IT.NE.3)GOTO5232
0112          AUX=(AUX+AUX0)/2.
0113          AUX0=AUX
0114   5232   AUX1=2.*D*(1.-RNU)*AN
0115          RI=(AUX+AUX0)/(AUX1*AN)*CIM(GN,RNU)
0116          RJ=(AUX-AUX0)/(AUX1*AN)*CJM(GN,RNU)
0117          RKK=(AUX-AUX0)/AUX1*CKM(GN,RNU)
0118          RL=(AUX+AUX0)/AUX1*CLM(GN,RNU)
0119   5240   AUX=XX
0120          AUX0=YY
0121          AUX1=AN*AUX0
0122          AUX2=1.-RNU
0123          CH=CHP(AUX1)
0124          SH=SHP(AUX1)
0125          GO TO(1240,1250,1260),IT
0126    1240  AUX3=-RNU
0127    1245  AUX=D*AN*AN*COS(AN*AUX)*(AUX2*(RI*CH+RJ*SH+RKK*AUX0
0128         C*CH+RL*AUX0*SH)+2.*AUX3/AN*(RKK*SH+RL*CH
0129         C))*(3-2*IT)
0130          GO TO 1280
0131    1250  AUX3=1.
0132          GO TO 1245
0133    1260  AUX=D*AUX2*AN*AN*SIN(AN*AUX)*(RI*SH+RJ*CH
0134         C+RKK*(AUX0*SH+CH/AN)+RL*(AUX0*CH+
0135         CSH/AN))
0136    1280  AUX=AUX*12./ESP**3
0137   5250   AUX=AUX*ESP/2.*CRED
0138          TN(1,K)=TN(1,K)-AUX
0139          TN(3,K)=TN(3,K)+AUX
0140          IF(I1.EQ.2)GOTO5299
0141          I1=2
0142          CRED=(ESP/HI(NP))**3
0143          IF(IT.NE.1)CRED=(CRED+RK(3,NP))/2.
0144          IF(IZ.GT.ITIP)GOTO5260
0145          AUX=RBUF(4*NN*(IZ-1)+3*NN+N)
0146          GOTO5270
0147   5260   AUX=-RBUF(4*NN*(ITIP-1)+3*NN+N)
0148   5270   AUX0=RBUF(4*NN*(IZ-2)+3*NN+N)
0149          IF(IT.NE.3)GOTO5280
0150          AUX=(AUX-AUX0)/2
0151          AUX0=-AUX
0152   5280   IF((IT.NE.1).OR.(NP.LT.2).OR.(NP.EQ.NS+2))GOTO5290
0153          AUX=(AUX+AUX0)/2
0154          AUX0=AUX
0155   5290   AUX1=2.*D*(1.-RNU)*AN*AN
0156          RI=(AUX-AUX0)/(AUX1*AN)*CIV(GN,RNU)
0157          RJ=(AUX+AUX0)/(AUX1*AN)*CJV(GN,RNU)
0158          RKK=(AUX+AUX0)/AUX1*CKV(GN,RNU)
```

```
0159          RL=(AUX-AUX0)/AUX1*CLV(GN,RNU)
0160          GOTO5240
0161   5299   IO=2
0162          CRED=RK(2,NP)
0163          IF(IT.NE.1)CRED=(CRED+RK(1,NP))/2.
0164          GO TO 5215
0165   5300   IO=3
0166          AUX=FPP(N,NS,HI,CB,FRI,XJ,RNU,ESP,RLP,FPT,B0)
0167          AUX0=AUX
0168          GOTO 5214
0169   6200   CONTINUE
0170   6209   CONTINUE
0171          INAM(2)=2HC4
0172          CALL BWR(2,IW0,KBUF,180)
0173          IW01(4)=IW01(2)
0174          IW01(5)=0
0175          IW01(6)=0
0176          CALL BWR(2,IW01,MBUF,186)
0177   9999   CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0178          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0179          END
0180   C----
0181   C----
0182   C----
0183   C----      FONCTION SINUS HYPERBOLIQUE
0184          FUNCTION SHP(X)
0185          SHP=EXP(X)
0186          SHP=(SHP-1./SHP)/2.
0187          END
0188   C----
0189   C----      FONCTION COSINUS HYPERBOLIQUE
0190          FUNCTION CHP(X)
0191          CHP=EXP(X)
0192          CHP=(CHP+1./CHP)/2.
0193          END
0194   C----
0195   C----
0196   C----      FONCTIONS M,N,O,P(MOMENT FLECHISSANT);IN,JN,KN,LN(FLEXION)
0197   C----
0198          FUNCTION CIM(GN,RNU)
0199          CIM=((1.-RNU)*GN*CHP(GN)-(1.+RNU)*SHP(GN))/((3.+RNU)/2.*
0200         CSHP(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
0201          END
0202   C----
0203          FUNCTION CJM(GN,RNU)
0204          CJM=((1.-RNU)*GN*SHP(GN)-(1.+RNU)*CHP(GN))/((3.+RNU)/2.*
0205         CSHP(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
0206          END
0207   C----
0208          FUNCTION CKM(GN,RNU)
0209          CKM=-(1.-RNU)*CHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
0210          END
0211   C----
0212          FUNCTION CLM(GN,RNU)
0213          CLM=-(1.-RNU)*SHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
0214          END
0215   C----
0216   C----
0217   C----      FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT NORMAL
0218   C----
0219          FUNCTION CIN(GN)
0220          CIN=-(SHP(GN)+GN*CHP(GN))/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0221          END
0222   C----
0223          FUNCTION CLN(GN)
0224          CLN=SHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0225          END
0226   C----
0227          FUNCTION CJN(GN)
0228          CJN=-(CHP(GN)+GN*SHP(GN))/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0229          END
0230   C----
0231          FUNCTION CKN(GN)
0232          CKN=CHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0233          END
0234   C----
0235   C----
0236   C----      FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT TRANCHANT
0237   C----
0238          FUNCTION CIT(GN)
```

```
0239          CIT=-GN*SHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0240          END
0241    C----
0242          FUNCTION CJT(GN)
0243          CJT=-GN*CHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0244          END
0245    C----
0246          FUNCTION CKT(GN)
0247          CKT=SHP(GN)/(SHP(2.*GN)-2.*GN)
0248          END
0249    C----
0250          FUNCTION CLT(GN)
0251          CLT=CHP(GN)/(SHP(2.*GN)+2.*GN)
0252          END
0253    C----
0254    C----
0255    C----     FONCTIONS I,J,K,L POUR L'EFFORT VERTICAL
0256    C----
0257    C----
0258          FUNCTION CIV(GN,RNU)
0259          CIV=((1.-RNU)*GN*SHP(GN)+2.*CHP(GN))/((3.+RNU)/2.*SHP
0260         C(2.*GN)-(1.-RNU)*GN)
0261          END
0262    C----
0263          FUNCTION CJV(GN,RNU)
0264          CJV=((1.-RNU)*GN*CHP(GN)+2.*SHP(GN))/((3.+RNU)/2.*SHP
0265         C(2.*GN)+(1.-RNU)*GN)
0266          END
0267    C----
0268          FUNCTION CKV(GN,RNU)
0269          CKV=-(1.-RNU)*SHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)+(1.-RNU
0270         C)*GN)
0271          END
0272    C----
0273          FUNCTION CLV(GN,RNU)
0274          CLV=-(1.-RNU)*CHP(GN)/((3.+RNU)/2.*SHP(2.*GN)-(1.-RNU
0275         C)*GN)
0276          END
0277    C----
0278    C----
0279          FUNCTION ROR(I,HI,FR,CB,ESP)
0280          DIMENSION HI(1),FR(1),CB(1)
0281          ROR=CB(I)/HI(I)*(1.-6.*FR(I)/HI(I)*(1.-ESP/HI(I)))
0282          END
0283    C----
0284          FUNCTION FPP(N,NS,HI,CB,FR,XI,RNU,ESP,RLP,FT,BB)
0285          DIMENSION HI(1),CB(1),FR(1),XI(1)
0286          FPP=0.
0287          AUX=(2*N-1)*3.141592/(2.*RLP)
0288          DO 10 I=1,NS+1
0289          FPP=FPP+ROR(I,HI,FR,CB,ESP)*(SIN(AUX*XI(I+1))-SIN(AUX*XI(I)))
0290   10     CONTINUE
0291          FPP=FPP*4.*FT/(2.*BB*(2*N-1)*3.141592)*RNU
0292          END
0293    C----
0294          END$
```

```
SCPC5  T=00003 IS ON CR00020 USING 00024 BLKS R=0000

0001        FTN4,B
0002  C----      DATE: 31/ 5/78
0003        PROGRAM CPC5
0004  C*****************************************************************
0005  C*                                                               *
0006  C*        SEGMENT POUR LA SORTIE DES CONTRAINTES (DESSIN).       *
0007  C*                                                               *
0008  C*****************************************************************
0009        DIMENSION TYZ(90)
0010       C,TN(3,30),TXZ(92),KBUF(180),IP(5),XC(32)
0011        COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0012       CPI,RMU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0013       C,IWO(6),KNAM(3)
0014        EQUIVALENCE (TN,KBUF),(TYZ,KBUF)
0015       C,(XC,RK),(LU1,IGO(2))
0016  C----
0017        CALL RMPAR(IP)
0018        CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0019        IF(IGO(5).EQ.1)GOTO7500
0020        IWO(4)=IWO(1)
0021        IWO(5)=0
0022        IWO(6)=0
0023        PO=2.*(BB(6)+BB(7))
0024        DO100 I=1,ITIP+1
0025        J=2
0026        IF(I.GT.ITIP)J=1
0027   100   PO=PO+BB(I)*J
0028        PO=FPT/(2.*PO*ESP)
0029  C----
0030  C----      SORTIE DE RESULTATS
0031  C----
0032        DO8900 I=1,50
0033        IZ=MOD(LBUF(2*I-1),10)
0034        JZ=IZ
0035        IF((MOD(JZ,2).EQ.0).AND.(JZ.LT.6))JZ=-JZ
0036        IF(IZ.EQ.0)GOTO9900
0037        IT=LBUF(2*I-1)/1000
0038        IC=MOD(LBUF(2*I-1),1000)/10
0039        IV=LBUF(2*I)
0040        BO=BB(IZ)
0041        CALL BWR(1,IWO,KBUF,180)
0042  7000  IF((I.EQ.1).AND.(IGO(2).EQ.6))CALL EXEC(3,1106B)
0043        J=2HS-
0044        K=2HX
0045        IF(IT.EQ.2)K=2HY
0046        IF(IT.LE.2)GO TO 7010
0047        J=2HTX
0048        K=2HY
0049  7010  L=2HX=
0050        IF(IC.NE.1)L=2HY=
0051        WRITE(LU1,7020)IZ,J,K,L,IV
0052  7020  FORMAT(5/,X"ZONE:"I2,5X,"CONTRAINTES"X,2A2,"(*1/PO)",5X
0053       C"ON FIXE"X,A2,I5,"CM."/)
0054        NX=21
0055        IF(JZ.LT.0)NX=5
0056        IF(IC.NE.1)NX=30
0057        NY=90
0058        IF((IC.EQ.20).OR.(IC.EQ.1))GOTO7219
0059        MO=IZ/2
0060        IF(IC.GT.20)MO=MOD(IC,10)
0061        DO7218 M=1,NX
0062        XC(M)=XI(MO,2)/5.*(M-1)
0063        IF(M.LE.5)GOTO7218
0064        XC(M)=XI(MO,2)*(1.-(10.-M)/25.)
0065        IF(M.LE.10)GOTO7218
0066        XC(M)=(XI(MO,M-9)+XI(MO,M-8))/2.
0067        IF(M.LT.21)GOTO7218
0068        XC(M)=XI(MO,NS+2)+(RLP-XI(MO,NS+2))/25.*(M-21)
0069        IF(M.LE.26)GOTO7218
0070        XC(M)=XI(MO,NS+2)+(RLP-XI(MO,NS+2))/5.*(M-25)
0071  7218  CONTINUE
0072        GOTO7044
0073  7219  AUX=0.
0074        AUX1=RLP/29.
0075        IF(IC.EQ.20)GO TO 7220
0076        AUX=-BO
0077        AUX1=BO*2/(NX-1)
0078  7220  DO 7230 M=1,NX
```

```
0079   7230   XC(M)=AUX+AUX1*(M-1)
0080   7044   DO 7050 N=1,3
0081          IF(N.EQ.1)WRITE(LU1,7045)2HSU,2HPE,2HRI,2HEU,2HRE
0082          IF(N.EQ.3)WRITE(LU1,7045)2HIN,2HFE,2HRI,2HEU,2HRE
0083          IF(N.EQ.2)WRITE(LU1,7045)2HMO,2HYE,2HNN,2HE ,2H
0084   7045   FORMAT(/,X"FIBRE"X,5A2,":")
0085          DO7046 IO=1,NX
0086   7046   TN(N,IO)=TN(N,IO)/PO
0087          WRITE(LU1,7030)(TN(N,IO),XC(IO),IO=1,NX)
0088   7030   FORMAT(5(F10.3,2X,"(XX="F8.2")"))
0089   7050   CONTINUE
0090   8900   CONTINUE
0091          GOTO9900
0092   7500   INAM(2)=2H50
0093          CALL WCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0094          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0095          GOTO9999
0096   9900   IF(IGO(2).EQ.6)CALL EXEC(3,1106B,-1)
0097          CALL EXEC(16,IWO(2)-IWO(1)+1,IWO(1),2)
0098   9999   END
0099          END$
```

```
SCP50  T=00004 IS ON CR00020 USING 00020 BLKS R=0183

0001   FTN4,B
0002   C----DATE:31/5/78
0003          PROGRAM CP50
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*          SEGMENT POUR LA SORTIE DES CONTRAINTES (ECRITURE)    *
0007   C*                                                               *
0008   C*****************************************************************
0009          DIMENSION TYZ(90)
0010         C,TN(3,30),TXZ(92),KBUF(180),IP(5),XC(32),IASC(6)
0011          COMMON INAM(3),IGO(5),ITIP,RLP,HI(15),NS,FRI(15),CB(15),
0012         CPI,RHU,ESP,EL,BB(7),FPT,XI(2,16),RK(3,15),LBUF(100),NNN
0013         C,IWO(6),KNAM(3)
0014          EQUIVALENCE (TN,KBUF),(TYZ,KBUF)
0015         C,(XC,RK),(LU1,IGO(2))
0016          DATA IASC/2H  ,2H  ,2H(*,2H1/,2HP0,2H) /
0017   C----
0018          CALL RMPAR(IP)
0019          CALL RCOM(INAM,390,IP(1),IP(2),IP(3))
0020          IWO(4)=IWO(1)
0021          IWO(5)=0
0022          IWO(6)=0
0023          P0=2.*(BB(6)+BB(7))
0024          DO100 I=1,ITIP+1
0025          J=2
0026          IF(I.GT.ITIP)J=1
0027   100     P0=P0+BB(I)*J
0028          P0=FPT/(2.*P0*ESP)
0029   C----
0030   C----      SORTIE DE RESUTATS
0031   C----
0032          I=0
0033   200    I=I+1
0034          IZ=MOD(LBUF(2*I-1),10)
0035          JZ=IZ
0036          IF((MOD(JZ,2).EQ.0).AND.(JZ.LT.6))JZ=-JZ
0037          IF(IZ.EQ.0)GOTO9999
0038          IT=LBUF(2*I-1)/1000
0039          IC=MOD(LBUF(2*I-1),1000)/10
0040          IY=LBUF(2*I)
0041          B0=BB(IZ)
0042          CALL BWR(1,IWO,KBUF,180)
0043   7000   J=2HS-
0044          K=2HX
0045          IF(IT.EQ.2)K=2HY
0046          IF(IT.LE.2)GO TO 7010
0047          J=2HTX
0048          K=2HY
0049   7010   L=2HX=
0050          IF(IC.NE.1)L=2HY=
0051          NX=21
0052          IF(JZ.LT.0)NX=5
0053          IF(IC.NE.1)NX=30
0054          NY=90
0055          IF((IC.EQ.20).OR.(IC.EQ.1))GOTO7219
0056          M0=IZ/2
0057          IF(IC.GT.20)M0=MOD(IC,10)
0058          DO7218 M=1,NX
0059          XC(M)=XI(M0,2)/5.*(M-1)
0060          IF(M.LE.5)GOTO7218
0061          XC(M)=XI(M0,2)*(1.-(10.-M)/25.)
0062          IF(M.LE.10)GOTO7218
0063          XC(M)=(XI(M0,M-9)+XI(M0,M-8))/2.
0064          IF(M.LT.21)GOTO7218
0065          XC(M)=XI(M0,NS+2)+(RLP-XI(M0,NS+2))/25.*(M-21)
0066          IF(M.LE.26)GOTO7218
0067          XC(M)=XI(M0,NS+2)+(RLP-XI(M0,NS+2))/5.*(M-25)
0068   7218   CONTINUE
0069          GOTO7044
0070   7219   AUX=0.
0071          AUX1=RLP/29.
0072          IF(IC.EQ.20)GO TO 7220
0073          AUX=-80
0074          AUX1=80*2/(NX-1)
0075   7220   DO 7230 M=1,NX
0076   7230   XC(M)=AUX+AUX1*(M-1)
0077   7044   DO 7050 N=1,3
0078          DO7046 I0=1,NX
```

```
0079  7046   TN(M,IO)=TN(M,IO)/PO
0080  7050   CONTINUE
0081  7100   IF(IGO(5).EQ.0)GO TO 8900
0082  C----      TRACE DE COURBES
0083         CALL PLTLU(10)
0084         IF(I.NE.1)GO TO 7210
0085         PAUSE 2
0086         READ(1,*)LU2
0087         CALL PLOT(3.,30.,-3)
0088         YM=30.
0089  7210   DO 7215 M=1,3
0090         DO 7215 MO=1,NX
0091  7215   TXZ(30*(M-1)+MO)=TN(M,MO)
0092         READ(LU2,*)KCOD,YMIN,YMAX,DDY,XMIN,XMAX,DDX
0093         WRITE(LU1,7216)KCOD,YMIN,YMAX,DDY,XMIN,XMAX,DDX
0094  7216   FORMAT(I10,6F15.4)
0095         GOTO(7235,8900,7238,9999),KCOD+1
0096  7235   YM=YM-DDY-3.
0097         IF(YM.GE.0.)GOTO7236
0098         CALL PLOT(30.,30.-YM-DDY-3.,-3)
0099         YM=30.
0100         GOTO7235
0101  7236   CALL PLOT(0.,-DDY-3.,-3)
0102  7238   XC(NX+1)=0.
0103         XC(NX+2)=XMAX
0104         IF(IC.NE.1)XC(NX+2)=XMAX-XMIN
0105         XC(NX+2)=XC(NX+2)/DDX
0106         TXZ(NY+1)=YMIN
0107         TXZ(NY+2)=(YMAX-YMIN)/DDY
0108         YO=ABS(TXZ(NY+1))/TXZ(NY+2)
0109         CALL PLOT(0.,YO,-3)
0110         IO=NX
0111         KI=1
0112         XXO=0.
0113         XX1=XMIN
0114         KJI=-1
0115         IF(IC.EQ.1)GOTO7245
0116         XXO=XMIN
0117         XX1=0.
0118         KJI=1
0119         DO7242 M=1,IO
0120         IF(XC(M).GE.XXO)GOTO7244
0121  7242   CONTINUE
0122  C****
0123         STOP5555
0124  C****
0125  7244   KI=M
0126         DO7243 IO=KI,NX-1
0127         IF(XC(IO+1).GT.XMAX)GOTO7245
0128  7243   CONTINUE
0129         IO=NX
0130  7245   DO 7300 M=1,3
0131         IM=2*M-1
0132         IF(M.NE.3)IM=4-IM
0133         XA=(XC(KI)*KJI-XXO+XX1)/XC(NX+2)
0134         YA=TXZ(KI)/TXZ(NY+2)
0135         CALL PLOT(XA,YA,3)
0136         DO7265 KK=KI+1,IO
0137         XB=(XC(KK)*KJI-XXO+XX1)/XC(NX+2)-XA
0138         YB=TXZ(KK)/TXZ(NY+2)-YA
0139         II=2
0140         DO7260 LK=1,IM
0141         XD=XA+XB/MINO(IM,3)*MINO(LK,3)
0142         YD=YA+YB/MINO(IM,3)*MINO(LK,3)
0143         IF((LK.EQ.1).OR.(LK.EQ.5).OR.(IM.NE 5))GOTO7255
0144         XD=XA+XB/9.*(LK+2)
0145         YD=YA+YB/9.*(LK+2)
0146  7255   CALL PLOT(XD,YD,II)
0147         II=5-II
0148  7260   CONTINUE
0149         XA=XD
0150         YA=YD
0151  7265   CONTINUE
0152         IF(M.EQ.3)GO TO 7300
0153         DO 7270 MO=1,30*(3-M)
0154  7270   TXZ(MO)=TXZ(MO+30)
0155  7300   CONTINUE
0156         IF(KCOD.EQ 2)GOTO7310
0157         CALL PLOT(DDX,0.,3)
0158         CALL PLOT(0.,0.,2)
```

```
0159  7310   CALL PLOT(0.,-Y0,-3)
0160         IF(KCOD.EQ.2)GOTO8900
0161         CALL PLOT(DDX,0.,2)
0162         II=XMAX+0.001
0163         CALL CODE
0164          WRITE(IASC,7311)II
0165          CALL SYMB(DDX,-0.3,0.25,IASC,0.,4)
0166          II=XX0+0.001
0167         CALL CODE
0168         WRITE(IASC,7311)II
0169  7311   FORMAT(I4)
0170         CALL SYMB(0.,-0.3,0.25,IASC,0.,4)
0171         IASC(1)=2HS-
0172         IASC(2)=2HX
0173         IF(IT.EQ.2)IASC(2)=2HY
0174         IF(IT.LE.2)GOTO7320
0175         IASC(1)=2HTX
0176         IASC(2)=2HY
0177  7320   CALL AXES(-0.2,0.,IASC,12,DDY,90.,1.,TXZ(NY+1),TXZ(NY+2))
0178  8900   IF(I.LT.50)GOTO200
0179   9999  CALL EXEC(16,IW0(2)-IW0(1)+1,IW0(1),2)
0180         END
0181         END$
```

```
SDCPR  T=00004 IS ON CR00020 USING 00002 BLKS R=0007

0001          FTN4,B
0002   C----      DATE: 16/ 5/78
0003          PROGRAM DCPR
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*          PROGRAMME POUR LE CALCUL ET LE TRACE DES CONTRAINTES  *
0007   C*          PRINCIPALES(LESQUELLES SONT STOCKEES SUR LE           *
0008   C*          IFIL(3))                                             *
0009   C*                                                               *
0010   C*****************************************************************
0011          DIMENSION IFIL(3),IDCB(144),IP(5),X(20),Y(8),CR(3,20),
0012         CIWO(6),JP(8),KP(20),TN(3,30),JBUF(768)
0013          EQUIVALENCE (JBUF,TN),(LU1,IP(1)),(X,JBUF(181)),(KP,JBUF(221))
0014         C,(LU,IP(2)),(JBUF(241),Y),(JBUF(257),JP),(JBUF(265),CR)
0015          CALL RMPAR(IP)
0016          CALL PLTLU(10)
0017          CALL EXEC(15,2,IWO(1),I,IWO(3))
0018          IWO(2)=IWO(1)+1
0019          IF(IWO(1).LT.0)STOP111
0020          IF((IWO(3).NE.96).OR.(I.NE.2))STOP222
0021          IWO(4)=IWO(1)
0022          IWO(5)=0
0023          IWO(6)=0
0024          I=9000
0025          K=1
0026          WRITE(7,9)
0027   9      FORMAT(/X"IFIL?")
0028          READ(LU,99)IFIL
0029   99     FORMAT(3A2)
0030          CALL OPEN(IDCB,IERR,IFIL)
0031          IF(IERR.NE.1)STOP224
0032   333    L=MIN0(I,768)
0033          CALL READF(IDCB,IERR,JBUF,L,LEN,K)
0034          IF(IERR.NE.0)STOP225
0035          CALL BWR(2,IWO,JBUF,L)
0036          K=K+6
0037          I=I-L
0038          IF(I.GT.0)GOTO333
0039          CALL CLOSE(IDCB)
0040          WRITE(7,1)
0041    1     FORMAT(/X"NPX? NPY? HD? YD? X0? XA? XB? XC? YB? ")
0042          READ(LU,*)NPX,NPY,HD,YD,X0,XA,XB,XC,YB
0043          WRITE(7,19)
0044          READ(LU,*)ECHC,RLMAX,P0
0045    19    FORMAT(/X"ECHC ?   RLMAX ?   P0 ? ")
0046          ECHD=HD/YD
0047          CALL PLOT(0.,HD,3)
0048          CALL PLOT((XC-X0)*ECHD,HD,2)
0049          CALL PLOT((XB-X0)*ECHD,0.,3)
0050          CALL PLOT((XB-X0)*ECHD,YB*ECHD,2)
0051          CALL PLOT((XA-X0)*ECHD,YB*ECHD,2)
0052          CALL PLOT((XA-X0)*ECHD,0.,2)
0053          WRITE(LU1,2)
0054   2      FORMAT(/X"CALCUL CONTRAINTES PRINCIPALES:"2/,10X"X"9X"Y"8X"CX"
0055         CSX"CY"7X"CXY"7X"C-I"6X"C-II"6X"ALFA")
0056          WRITE(7,4)
0057          READ(LU,*)X
0058          WRITE(7,5)
0059          READ(LU,*)Y
0060          WRITE(7,6)
0061          READ(LU,*)IF
0062          WRITE(7,7)
0063          READ(LU,*)JP
0064          WRITE(7,8)
0065          READ(LU,*)KP
0066   4      FORMAT(/X"X?")
0067   5      FORMAT(/X"Y?")
0068   6      FORMAT(/X"IF?")
0069   7      FORMAT(/X"JP?")
0070   8      FORMAT(/X"KP?")
0071          DO80 LO=1,NPY
0072          IWO(4)=IWO(1)
0073          IWO(5)=0
0074          IWO(6)=0
0075          CALL SWO(IWO,IWO,180*(JP(LO)-1))
0076          DO60 K=1,3
0077          CALL BWR(1,IWO,TN,180)
0078          DO60 L=1,NPX
```

```
      CR(K,L)=TH(IF,KP(L))/P0
      IF((K.EQ.3).AND.(LO.EQ.NPY).AND.(IP(3).EQ.1))CR(3,L)=0.
60    CONTINUE
      DO 80 L1=1,NPX
      AUX=-CR(3,L1)
      CALL CPRIN(CR(1,L1),CR(2,L1),AUX,TP1,TP2,ALFA)
      ALD=ALFA*180./3.141592
      WRITE(LU1,3)X(L1),Y(LO),(CR(J,L1),J=1,3),TP1,TP2,ALD
3     FORMAT(X8F10.2)
      XX=(X(L1)-X0)*ECHD
      YY=(Y(LO)-Y0)*ECHD
      DC=TP1*ECHC*COS(ALFA)/2.
      DS=TP1*ECHC*SIN(ALFA)/2.
      EC=TP2*ECHC*COS(ALFA)/2.
      ES=TP2*ECHC*SIN(ALFA)/2.
      RL1=SQRT(DC**2+DS**2)
      REDX=1.
      IF(RL1.LT.RLMAX)GOTO20
      REDX=RLMAX/RL1
      CALL SYMB(XX,YY,.2,5,ALD,-1)
20    RL2=SQRT(EC**2+ES**2)
      REDY=1.
      IF(RL2.LT.RLMAX)GOTO30
      REDY=RLMAX/RL1
      CALL SYMB(XX,YY,.2,0,ALD,-1)
30    X1=XX+DC*REDX
      Y1=YY+DS*REDX
      X2=XX-DC*REDX
      Y2=YY-DS*REDX
      CALL PLOT(X1,Y1,3)
      CALL SYMB(X1,Y1,.2,9,ALD-90.,-1)
      CALL PLOT(X2,Y2,2)
      CALL SYMB(X2,Y2,.2,9,ALD+90.,-1)
      X3=XX-ES*REDY
      Y3=YY+EC*REDY
      X4=XX+ES*REDY
      Y4=YY-EC*REDY
      CALL PLOT(X3,Y3,3)
      CALL SYMB(X3,Y3,.2,3,ALD,-1)
      CALL PLOT(X4,Y4,2)
      CALL SYMB(X4,Y4,.2,3,ALD,-1)
80    CONTINUE
      END
C---- SUBROUTINE CPRIN
      SUBROUTINE CPRIN(TX,TY,TXY,T1,T2,ALFA)
      T1=0.
      T2=0.
      ALFA=0.
      IF(TX.EQ.TY)GOTO5
      ALFA=0.5*ATAN(2.*TXY/(TX-TY))
      GOTO10
5     ALFA=0.5*3.141592/2.
      IF(TXY.EQ.0.)ALFA=0.
      IF(TXY.LT.0.)ALFA=-ALFA
 10   SC=COS(ALFA)
      T1=SIN(ALFA)
      C2=SC*SC
      S2=T1*T1
      SC=SC*T1
      T1=C2*TX+S2*TY+2 *SC*TXY
      T2=S2*TX+C2*TY-2.*SC*TXY
      END
      END$
```

```
SELFA  T=00003 IS ON CR00040 USING 00016 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE:26/4/78
0003   C----
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*          STOCKE SUR SELFA (DOS):SUBROUTINES 'SWO' ET 'BWR', POUR  *
0007   C*          LES TRANFERTS ENTRE LA MEMOIRE CENTRALE ET L'AIRE DE  *
0008   C*          TRAVAIL DU DISQUE.                                    *
0009   C*                                                               *
0010   C*****************************************************************
0011   C----
0012   C----
0013   C----
0014          SUBROUTINE SWO(IWO1,IWO,NW)
0015          DIMENSION IWO1(1),IWO(1),LAB(3)
0016          DATA NCR/32000/,NSECT/48/,LAB/2H S,2HWO/,NMOT/128/
0017          DO 10 J=1,6
0018    10    IWO(J)=IWO1(J)
0019          IF(NW.EQ.0)GO TO 20
0020          LAB(3)=2H/1
0021           IF((NW.LT.0).OR.(NW.GT.NCR))GOTO30
0022          IWO(6)=IWO(6)+NW
0023          IF(IWO(6).LT.NMOT)GO TO 20
0024          NO=IWO(6)/NMOT
0025          IWO(5)=IWO(5)+NO
0026          IWO(6)=IWO(6)-NMOT*NO
0027          IF(IWO(5).LT.NSECT)GO TO 20
0028          NO=IWO(5)/NSECT
0029          IWO(4)=IWO(4)+NO
0030          IWO(5)=IWO(5)-NSECT*NO
0031   20     LAB(3)=2H
0032          IF(IWO(3).NE.NSECT)LAB(3)=2H/2
0033          IF((IWO(4).LT.IWO(1)).OR.(IWO(4).GT.IWO(2)+1))LAB(3)=2H/3
0034          IF((IWO(4).EQ.IWO(2)+1).AND.(IWO(5)+IWO(6).NE.0))LAB(3)=2H/3
0035          IF((IWO(5).LT.0).OR.(IWO(5).GE.NSECT))LAB(3)=2H/4
0036          IF((IWO(6).LT.0).OR.(IWO(6).GE.NMOT))LAB(3)=2H/5
0037          IF(LAB(3).EQ.2H  )GO TO 40
0038   30     CALL EXEC(2,18,LAB,-6)
0039   C****
0040          STOP 13
0041   C****
0042   40     END
0043   C----
0044   C----
0045   C----
0046          SUBROUTINE BWR(ICOD,IWO,IBUF,NW)
0047          DIMENSION IWO(1),IBUF(1),IBO(128),INAM(3)
0048          DATA ICON/1028/,INAM/2H B,2HWR,2H :/,NDMA/15999/,NMOT/128/
0049          IF((ICOD.NE.1).AND.(ICOD.NE.2))GO TO 120
0050          IF((NW.LT.0).OR.(NW.GT.NDMA))GO TO 130
0051          IF(NW.EQ.0)GO TO 150
0052          ITRK=IWO(4)
0053          ISECT=IWO(5)
0054          IOFF=IWO(6)
0055          CALL SWO(IWO,IWO,NW)
0056          NW1=IWO(6)
0057          NWO=0
0058          NWP=NW-NW1
0059          IF(IOFF.EQ.0)GO TO 35
0060          CALL EXEC(1,ICON,IBO,NMOT,ITRK,ISECT)
0061          NWO=MIN0(NMOT-IOFF,NW)
0062          NWP=NWP-NWO
0063          IF(ICOD.EQ.1)GO TO 20
0064          DO 10 J=1,NWO
0065    10    IBO(J+IOFF)=IBUF(J)
0066          CALL EXEC(2,ICON,IBO,NMOT,ITRK,ISECT)
0067   20     IF(NWP.LE.0)GO TO(55,70),ICOD
0068   22     ISECT=ISECT+1
0069          IF(ISECT.LT.IWO(3))GO TO 25
0070          ISECT=0
0071          ITRK=ITRK+1
0072   25     IF(ICOD.EQ.1)GO TO 40
0073          DO 30 J=1,NWP
0074   30     IBUF(J)=IBUF(J+NWO)
0075          GO TO 40
0076   35     IF(NWP.LE.0)GO TO 70
0077   C!!!!
0078   C!!!! EN RTE,OU LES TRANSFERTS NE PEUVENT PAS SE CHEVAUCHER ENTRE
```

```
C!!!! DEUX PISTES,ON DOIT UTILISER LES LIGNES DE COMMENTAIRES QUI
C!!!!SUIVENT:
C41     JOFS=ISECT
C       NSECT=NWP/NMOT+JOFS
C       NTRAK=NSECT/IWO(3)
C       IF(MOD(NSECT,IWO(3)).NE.0)NTRAK=NTRAK+1
C       IF(NTRAK.LT.2)GOTO49
C       IF(ICOD.EQ.2)GOTO220
C       JTRAK=ITRK+NTRAK-1
C180    MSECT=IWO(3)*(JTRAK-ITRK)
C       JSECT=0
C       IF(JTRAK.EQ.ITRK)JSECT=JOFS
C       LMOT=NMOT*(NSECT-MSECT-JSECT)
C205    CALL EXEC(1,102B,IBUF,LMOT,JTRAK,JSECT)
C       IF(JTRAK.EQ.ITRK)GOTO51
C240     JSECT=NMOT*(MSECT-JOFS)
C       DO 210 J=LMOT,1,-1
C210    IBUF(JSECT+J)=IBUF(J)
C       JTRAK=JTRAK-1
C       NSECT=MSECT
C       GOTO180
C220    JTRAK=ITRK
C       LSECT=IWO(3)
C       MSECT=0
C       LMOT=NMOT*(LSECT-JOFS)
C       JSECT=JOFS
C       GOTO235
C230    LMOT=NMOT*(LSECT-MSECT)
C       JSECT=NMOT*(MSECT-JOFS)
C       DO 233 J=1,LMOT
C233    IBUF(J)=IBUF(JSECT+J)
C       JSECT=0
C235    CALL EXEC(2,102B,IBUF,LMOT,JTRAK,JSECT)
C       IF(JTRAK.EQ.ITRK+NTRAK-1)GOTO240
C       JTRAK=JTRAK+1
C       MSECT=LSECT
C       LSECT=LSECT+IWO(3)
C       IF(LSECT.GT.NSECT)LSECT=NSECT
C       GOTO230
C!!!!
C!!!!
40      CALL EXEC(ICOD,ICON,IBUF,NWP,ITRK,ISECT)
51      IF(IOFF.EQ.0)GO TO 70
        DO 50 J=NWP,1,-1
50      IBUF(J+NWO)=IBUF(J)
55      DO 60 J=1,NWO
60      IBUF(J)=IBO(J+IOFF)
C----      LE CALL EXEC COMPLETE UN NOMBRE ENTIER DE SECTEURS(PAR EXCES)
70      IF(NWP.LT.0)GO TO 150
        IF(NW1.EQ.0)GO TO 150
        NWP=NWP+NWO
        CALL EXEC(1,ICON,IBO,NMOT,IWO(4),IWO(5))
        GO TO(80,100),ICOD
80      DO 90 J=1,NW1
90      IBUF(J+NWP)=IBO(J)
        GO TO 150
 100    DO 110 J=1,NW1
 110    IBO(J)=IBUF(J+NWP)
        CALL EXEC(2,ICON,IBO,NMOT,IWO(4),IWO(5))
        GO TO 150
C----
 120    INAM(3)=2H 1
        GO TO 140
 130    INAM(3)=2H 2
 140    CALL EXEC(2,1B,INAM,-6)
C****
        STOP 14
C****
C----
 150    END
        END$
```

ANNEXE C - SERIE DE PROGRAMMES 'ELF'

Elle comporte les sous-programmes ELF Ø, ELF1, ELF2, ELF3, ELF4, ELF5, ELF6, ELF7, ELF8, ELF9, ELF10, EL1A, EL1B, EL1 , EL12, et EL13. EL70

Les subroutines 'BWR' et 'SWO' sont identiques à celles utilisées dans le programme 'CPC'.

1.- Description des variables du 'Common'.

IGO (5) .- Vecteur avec les différentes options du programme:

IGO (1) = 1; premier passage du programme
2; continuation du chargement, à partir de l'état final lors d'une utilisation préalable du programme.
3; tracé des contraintes principales.

IGO (2) = 1; tracé de la maille d'éléments
0; rien.

IGO (3) = (unité logique de lecture de données + 100 x unité logique de lecture du nom du fichier de stockage des résultats).

IGO (4) = unité logique d'écriture

IGO (5) = 1; stockage dans un fichier des résultats à la fin de chaque étape de chargement.
0; rien.

ITITRE (36) .- Titre, jusqu'à 72 caractères.

IWO (6) .- Similaire au programme 'CPC'.

INAM (3) .- " " "

IFIL (3) .- Nom dufichier pour le stockage des résultats à la fin de chaque étape de chargement.

NE .- Nombre d'éléments

NP .- Nombre de points nodaux

NR .- Nombre de points nodaux qui ont les déplacements empêchés.

NC .- Nombre de cas de chargement.

JCØ .- Nombre de cas de chargement qu'on est entrain de calculer (absolu).

JC .- " " " "
" (relatif, c'est à dire à l'intérieur d'un passage du programme).

EB .- Module d'élasticité du béton (kg/cm2).

EA .- Idem de l'acier.

VU .- Module de Poisson dubéton.

FB .- Résistance ultime du béton (uniaxial), en kg/cm2

FA .- Idem de l'acier.

DA .- Déformation ultime de l'acier.

ESP .- Epaisseur du hourdis (en cm).

TØ .- Précompression générale initiale dans le hourdis (kg/cm2).

IMAT (NE).- Type d'élément : - 1; béton

IMAT = -(1000+α(degrés)) pour le béton fissuré en direction normale à α

IMAT = -(3000 + α (degrés)) pour le béton fissuré en deux directions (α et sa normale)

IMAT= 0; acier

IMAT= 4 0 0; de liaison hourdis - parois latérales

0<IMAT < 180 ; de liaison acier-béton, avec une orientation α (degrés) = IMAT

IMAT= 200; idem, avec α = o

NPE (3, NE) .- Points nodaux (i,j,k) de chaque élément.

Dans les éléments d'acier, NPE (3,i) = aire des armatures (mm2).

Dans les éléments de liaison acier-béton, NPE (3,i) = surface d'adhérence affectée à l'élément (cm2).

TENS (3,NE) .- Contraintes dans les éléments :

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, pour le béton

σ^* (cf. 3.3.4) , pour l'acier

σ_h, σ_v (cf. 3.3.5), pour les éléments de liaison.

DEF (3,NE) .- Déformations dans les éléments :

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$, pour le béton.

ε^* (cf. 3.3.4), pour l'acier .

$\varepsilon_h, \varepsilon_v$, (cf. 3.3.5) pour les éléments de liaison.

FIS (NE) .- Dans les éléments de béton fissuré, valeur de $\sigma_{IR}/(\varepsilon_f - \varepsilon_{IR})^2$, au moment de la fissuration (cf. 3.4.4)

JCOOR(2,NP) .- Coordonnées x, y de chaque point nodal (en cm).

CHARG (2 NP) .- Forces F_x, F_y appliquées sur chaque point nodal (en kg)

DEPL (2 NP) .- Déplacements u, v de chaque point nodal (en cm).

ILM (2,NP) .- Mouvements empêchés dans les points nodaux :
ILM (1) : numéro du point nodal;
ILM (2) : code = ab.
a = 0; si u (i) est libre
1; si u (i) est empêché
b = 0; si v (i) est libre
1; si v (i) est empêché.

TOLER .- Ø; si les contraintes non équilibrées sont négligeables
1; si la convergence n'est pas obtenue.

ITER .- numéro de l'itération en cours, dans chaque étape de chargement.

NITER .- Le programme écrit les forces nodales non équilibrées toutes les NITER itération.

NITER, IOFF, MXE, MXR, MXP.- Variables auxiliaires.

2.- Listings

```
SELF0  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002    C----DATE:28/ 8/78
0003          PROGRAM ELF0
0004    C*****************************************************************
0005    C*                                                               *
0006    C*     PROGRAMME INITIAL.LECTURE DES DONNEES ET INITIALISATION   *
0007    C*     DU PROCESSUS DE CALCUL.                                   *
0008    C*                                                               *
0009    C*****************************************************************
0010          DIMENSION IBUF(5),IP(5),IHEUR(5),RBUF(2),LBUF(400),TBUF(2,400)
0011          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0012         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0013         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0014         CNPE(3,600),TEMS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIB(600),
0015         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILN(2,100)
0016          EQUIVALENCE (IBUF(2),RBUF),(LU1,IGO(4))
0017    C-----
0018    C-----MAXIMUM:ELEMENTS:600...POINTS NODAUX:400...POINTS NON LIBRES:100
0019    C-----
0020    C-----GRANDEUR COMMON:86+18*NE+10*NP+2*NR
0021    C-----
0022    C----NOMBRE SECTEURS IFIL:48*(3+IFIX(NP*240./6144.)+IFIX(NP*30./6144.)
0023    C----- +IFIX(NE*36./6144.))+5+(NE-1)/128+(2NE-1)/128+(4NP-1)/128
0024    C----- +2((6NE-1)/128)
0025    C-----
0026          CALL RMPAR(IGO)
0027    C----  IGO(1): CALCUL INITIAL(+-1) CALCUL CONTINUATION(+-2)
0028    C----            TRACE CONTRAINTES(3)//IL SERA NEGATIF SI L'ON
0029    C----            DESIRE LAISSER STOCKES LES RESULTATS INTERMEDIAIRES
0030    C----  IGO(2): TRACE DU SCHEMA DES ELEMENTS(0,1)
0031    C----  IGO(3): UN.LOG.LECTURE+100*UN.LOG.LECTURE TITRE ET FICHIER STOCK.
0032    C----  IGO(4): UN.LOG.ECRITURE
0033    C----  IGO(5):1,SI IGO(1) NEGATIF;0,SI IGO(1) POSITIF
0034    C----
0035          IF(IGO(5).EQ.1)IGO(1)=-IGO(1)
0036          MXE=600
0037          MXP=400
0038          MXR=100
0039          INAM(1)=2HEL
0040          INAM(2)=2HF1
0041          INAM(3)=2H
0042          LU=IGO(3)/100
0043    C-----LECTURE DU TITRE ET DES DONNEES GENERALES
0044          READ(LU,10)ITITRE
0045          IF(LU1.EQ.6)CALL EXEC(3,11068,-1)
0046          WRITE(LU1,20)MXE,MXP,MXR,ITITRE
0047    10    FORMAT(36A2)
0048    20    FORMAT(5/,X,"*PROGRAMME ,ELF, (ELEMENTS FINIS BIDIMENSIONELS)*"
0049         C2/,X"NOMBRE ELEMENTS<="I5,/X"NOMBRE POINTS NODAUX<="I5,
0050         C/X"NOMBRE POINTS NON LIBRES<="I5,
0051         C4/,X"TITRE:"/,X,36A2)
0052          IFIL(3)=2H
0053          READ(LU,10)IFIL
0054          LU=MOD(IGO(3),100)
0055          WRITE(LU1,22)IFIL
0056    22    FORMAT(5/,X"FICHIER DU DISQUE POUR STOCKAGE FINAL:"3A2)
0057          IF(IFIL(1).EQ.2H  )GOTO25
0058          CALL EXEC(18,IFIL,ISECT)
0059          IF(ISECT.NE.0)GOTO25
0060          WRITE(LU1,23)
0061    23    FORMAT(2/,"FICHIER NON TROUVE")
0062    C****
0063          STOP1003
0064    C****
0065    25    CALL EXEC(11,IHEUR)
0066          WRITE(LU1,26)(IHEUR(I),I=4,2,-1)
0067    26    FORMAT(3/,X"HEURES  :"I5,/X"MINUTES :"I5/X"SECONDES:"I5)
0068    28    READ(LU,*)NE,NP,NR,NITER
0069          WRITE(LU1,30)NE,NP,NR,NITER
0070          TOLER=0.
0071    30    FORMAT(2/,X"N.ELEMENTS:"10X,I4,/,X,"N.POINTS NODAUX:"5X,I4,/,X,
0072         C"N.POINTS NON LIBRES:"X,I4,
0073         C2/,X,"NITER:"I5)
0074    C-----LECTURE DES CARACTERISTIQUES DU BETON ET DE L,ACIER
0075          READ(LU,*)EB,YU,FB,ESP,EA,FA,DA,TO
0076          WRITE(LU1,40)EB,YU,FB,ESP,EA,FA,DA,TO
0077    40    FORMAT(3/,X"MATERIAUX:"2/,X"BETON"/,X"MOD ELASTICITE INITIAL"
0078         C"(KG/CM2):",3X,F10.2,/,X"MODULE POISSON(COMPRESSION UNIAXIALE):"
```

```
0079          C,F6.2,/,X"RES.COMPRESSION UNIAXIALE(KG/CM2):"
0080          CF10.2,/,X"EPAISSEUR DALLE(CM):"14X,
0081          CF10.2,2/,X"ACIER"/X"MOD.ELASTICITE(KG/CM2):"4X,F10.2,/,X,
0082          C"RESISTANCE ULTIME(KG/CM2):"F11.2,/,X"DEFORMATION ULTIME:"8X,
0083          CF10.3,4/,X"COMPRESSION INITIALE DU BETON(KG/CM2):"F10.2)
0084    C-----LECTURE DES DONNEES CONCERNANT LES ELEMENTS
0085     150  DO 200 I=1,NE
0086     200  READ(LU,*)K,IMAT(I),(NPE(J,I),J=1,3)
0087          WRITE(LU1,210)(I,IMAT(I),(NPE(J,I),J=1,3),I=1,NE)
0088     210  FORMAT(3/,X"ELEMENTS:"2/,X,"L=K(BETON);A(MM2)(ACIER)"
0089          C";S(CM2)(LIAISON)"2/,X,3("NUMERO:"X"TYPE:"3X"I"5X"J"5X"L"6X)
0090          C,/,500(X,3(I4,I8,I5,2I6,6X),/))
0091    C-----LECTURE DES COORDONNEES DES POINTS NODAUX ET MISE A ZERO DU
0092    C-----VECTEUR "CARG"
0093    C----- LES COORDONNEES DU CENTRE DE SYMETRIE SONT(0,0)
0094          J=1
0095          DO 220 I=1,NP
0096          CHARG(J)=0.
0097          CHARG(J+1)=0.
0098          J=J+2
0099     220  READ(LU,*)L,(JCOOR(K,I),K=1,2)
0100          WRITE(LU1,230)(I,(JCOOR(K,I),K=1,2),I=1,NP)
0101     230  FORMAT(3/,X"POINTS NODAUX:"2/,X,3("NUMERO:"4X"X(CM):"4X"Y(CM):"
0102          C,8X),2/,500(X,3(I4,X,2I10,3X),/))
0103          MXE=1+IFIX(NP*240./6144.)
0104          MXP=1+IFIX(NP*30./6144.)
0105          MXR=1+IFIX(NE*72./6144.)
0106          M=2+IFIX(NE*36./6144.)+2*MXE+MXP+MXR
0107          CALL EXEC(17,IWO(1),IWO(2),IWO(3))
0108          M=IWO(2)+1-IWO(1)
0109    C****
0110          IF(IWO(3).NE.48)STOP1004
0111    C****
0112          IF(M.GE.N)GOTO270
0113          WRITE(LU1260)N,M
0114     260  FORMAT(3/,X"WORK AREA PLEINE;NOMBRE PISTES DESIREES:"I4,
0115          C2X"NOMBRE PISTES DISPONIBLES:"I4)
0116    C****
0117          STOP 1005
0118    C****
0119     270  IWO(2)=IWO(1)+N-1
0120          IWO(4)=IWO(2)-MXE
0121          IWO(5)=0
0122          IWO(6)=0
0123          IOFF=0
0124          N=N-1-MXR-MXE
0125          N=N*48+5+(NE-1)/128+(2*NE-1)/128+(4*NP-1)/128+2*((6*NE-1)/128)
0126          IF(N.LE.ISECT)GOTO279
0127          WRITE(LU1,277)ISECT,N
0128    277   FORMAT(2/,X"NOMBRE SECTEURS IFIL:"I5,4X,"NOMBRE NECESSAIRE"
0129          C" DE SECTEURS:"I5)
0130    C****
0131          STOP1006
0132    C****
0133    278   IF(ICO(1).EQ.3)GOTO288
0134    C-----LECTURE DES RESTRICTIONS DE MOUVEMENTS
0135          DO 240 I=1,NR
0136     240  READ(LU,*)(ILM(J,I),J=1,2)
0137          WRITE(LU1,250)((ILM(J,I),J=1,2),I=1,NR)
0138     250  FORMAT(3/,X"MOUVEMENTS EMPECHES:"2/,X,3("P.NODAL:"5X"CODE:"
0139          C,10X)2/,500(X,3(I4,I12,10X),/))
0140    C-----LECTURE DES CHARGES ET STOCKAGE DANS L,AIRE DE TRAVAIL
0141          WRITE(LU1,280)
0142     280  FORMAT(3/,X"CHARGES:"2/,X"INCREMENT CHARGES:"4X"P.NODAL",5X
0143          C"X(KG)"7X"Y(KG)")
0144          DO285 I=1,NP
0145          READ(LU,*)LBUF(I),TBUF(1,I),TBUF(2,I)
0146          IF(LBUF(I).EQ.0)GOTO286
0147    285   CONTINUE
0148    286   K=I
0149     288  PAUSE 0000
0150          READ(LU,*)JCO,NC
0151          IF(ICO(1).EQ.3)GOTO400
0152          DO 350 I=1,NC
0153          READ(LU,*)AUX
0154          L=JCO+I-1
0155          WRITE(LU1,287)L,AUX
0156     287  FORMAT(2/,I11,"...FACTEUR:"F10.2)
0157          DO 340 J=1,K
0158          IBUF(1)=LBUF(J)
```

```
0159          IF(IBUF(1).EQ.0)GOTO300
0160          RBUF(1)=TBUF(1,J)*AUX
0161          RBUF(2)=TBUF(2,J)*AUX
0162          WRITE(LU1,290)L,IBUF(1),RBUF(1),RBUF(2)
0163   290    FORMAT(I11,12X,I4,5X,F10.3,2X,F10.3)
0164          IF(I.NE.1)GOTO 310
0165          CHARG(2*IBUF(1)-1)=RBUF(1)
0166          CHARG(2*IBUF(1))=RBUF(2)
0167          GOTO310
0168    300   RBUF(1)=0.
0169          RBUF(2)=0.
0170    310   IF(I.NE.1)CALL BWR(2,IWO,IBUF,5)
0171          IF(IBUF(1).EQ.0)GOTO 350
0172    340   CONTINUE
0173   C****
0174          STOP 1010
0175   C****
0176    350   CONTINUE
0177   400    WRITE(LU1,360)(IWO(J),J=1,3)
0178   360    FORMAT(3/,X"STOCKAGE SUR L'AIRE DE TRAVAIL:"/" IWO(1)="I5
0179         C,6X," IWO(2)="I5,6X" IWO(3)="I5)
0180   C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0181          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0182          END
0183          END$
```

```
SELF1  T=00003 IS ON CR00040 USING 00014 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE: 20/ 4/78
0003          PROGRAM ELF1
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DE L'ETAT INITIAL DE CONTRAINTES ET *
0007   C*     DEFORMATIONS DU BETON.                                    *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION KBUF(6144),RBUF(3072),TBUF(1800),DBUF(1800),IP(5)
0011          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0012         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0013         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0014         CMPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0015         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0016          EQUIVALENCE (KBUF,RBUF),(TENS,TBUF),(DEF,DBUF),(LU1,IGO(4))
0017   C-----
0018   C-----
0019          CALL RMPAR(IP)
0020          IF(IGO(1).EQ.3)GOTO1200
0021          IF(IABS(IGO(1)).EQ.2)GOTO980
0022          IF(TO.GE.0.)GOTO700
0023          AUX5=TO/EB
0024          AUX0=AUX5*VU*0.9
0025          GOTO900
0026   700    I=1
0027          AUX=EB
0028          AUX1=0.00218
0029    800   AUX0=TO/AUX
0030    810   AUX2=AUX0/AUX1
0031          AUX3=1.+(AUX*AUX1/FB-2.+AUX2)*AUX2
0032          AUX4=TO-AUX*AUX0/AUX3
0033          IF(AUX4.LE.TO*0.00001)GOTO850
0034   C****
0035          IF(AUX4.LT.0.)STOP 1040
0036   C****
0037          AUX0=AUX0+AUX4/(AUX*(1.-AUX2**2)/AUX3**2)
0038          GOTO 810
0039    850   IF(I.EQ.2)GOTO 900
0040          I=2
0041          AUX5=AUX0
0042          AUX=EB/VU
0043          AUX1=0.0008
0044          GOTO 800
0045    900   DO 950 I=1,NE
0046          FIS(I)=0.
0047          IF(IMAT(I).GE.0)GOTO 940
0048          TENS(1,I)=-TO
0049          TENS(2,I)=0.
0050          TENS(3,I)=0.
0051          DEF(1,I)=-AUX5
0052          DEF(2,I)=AUX0
0053          DEF(3,I)=0.
0054          GOTO950
0055   940    DO945 J=1,3
0056          TENS(J,I)=0.
0057   945    DEF(J,I)=0.
0058    950   CONTINUE
0059          AUX5=-AUX5
0060          WRITE(LU1,960)AUX5,AUX0
0061   960    FORMAT(3/,X"DEF.INIT.--X:"E15.6/" DEF.INIT.--Y:"E15.6)
0062   C-----NUMERO INCREMENT DE CHARGE=1
0063   C-----ITERATION NUMERO 1
0064    980   JC=1
0065          ITER=1
0066          IF(IABS(IGO(1)).NE.2)GOTO 1200
0067   C-----LECT. [KT],[ISP],[DB],"IMAT","FIS","CHARG","TENS"ET"DEF",STOCK.
0068   C-----DANS "IFIL" LORS D,UNE PREALABLE UTILISATION DU PROGRAMME
0069          NM=1
0070          NN=6144
0071          NS=NM*MXE
0072          ASSIGN 1040 TO ILB
0073          K=0
0074          I=0
0075    1000  IWO(4)=IWO(1)+I
0076          IWO(5)=0
0077          IWO(6)=0
0078          DO 1020 J=1,NS
```

```
0079          CALL EXEC(14,102B,KBUF,NN,IFIL,K)
0080          K=K+NN/128
0081          CALL BWR(2,IWO,KBUF,NN)
0082    1020  CONTINUE
0083          GOTO ILB
0084    1040  ASSIGN 1050 TO ILB
0085          I=MXE
0086          NS=NM*MXP
0087          GOTO 1000
0088    1050  ASSIGN 1060 TO ILB
0089          I=MXE+MXP+MXR
0090          NS=NM*(1+IFIX(NE*36./6144.))
0091          GOTO 1000
0092    1060  NS=NE
0093          ILB=0
0094    1065  I2=0
0095          ILB=ILB+1
0096    1070  J=MIN0(NS,NN)
0097          CALL EXEC(14,102B,KBUF,J,IFIL,K)
0098          K=K+J/128
0099          IF(MOD(J,128).NE.0)K=K+1
0100          NS=NS-J
0101          DO1080 I1=1,J/MIN0(2,ILB)
0102          GOTO(1071,1072,1073,1074,1075),ILB
0103    1071  IMAT(I2+I1)=KBUF(I1)
0104          GOTO1080
0105    1072  FIS(I2+I1)=RBUF(I1)
0106          GOTO1080
0107    1073  CHARG(I2+I1)=CHARG(I2+I1)+RBUF(I1)
0108          GOTO1080
0109    1074  TBUF(I2+I1)=RBUF(I1)
0110          GOTO1080
0111    1075  DBUF(I2+I1)=RBUF(I1)
0112    1080  CONTINUE
0113          I2=I2+J/MIN0(2,ILB)
0114          IF(NS.GT.0)GOTO1070
0115          GOTO(1084,1085,1090,1090,1200),ILB
0116    1084  NS=2*NE
0117          GOTO1065
0118    1085  NS=NP*4
0119          GOTO1065
0120    1090  NS=6*NE
0121          GOTO1065
0122    1200  IF(IGO(2).EQ.0)GOTO2000
0123  C-----TRACE DES ELEMENTS
0124          INAM(2)=2HF2
0125          GOTO 2010
0126  C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0127    2000  INAM(2)=2HF3
0128          IF(IABS(IGO(1)).EQ.2)INAM(2)=2HF7
0129          IF(IGO(1).EQ.3)INAM(2)=2H11
0130          IP(4)=0
0131    2010  CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0132          END
0133          END$
```

```
SELF2  T=00003 IS ON CR00040 USING 00016 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE: 22/ 3/78
0003          PROGRAM ELF2
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LE TRACE DES ELEMENTS.                     *
0007   C*                                                               *
0008   C*****************************************************************
0009          DIMENSION X(2),Y(2),IASC(2),IP(5)
0010          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0011         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0012         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0013         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0014         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILN(2,100)
0015   C-----
0016   C-----
0017          CALL RMPAR(IP)
0018   C---- OBTENTION DES ESCALES
0019          X(1)=1.E+30
0020          X(2)=-1.E+30
0021          Y(1)=1.E+30
0022          Y(2)=-1.E+30
0023          DO10 I=1,NP
0024          AUX=JCOOR(1,I)
0025          AUXO=JCOOR(2,I)
0026          X(1)=AMIN1(X(1),AUX)
0027          Y(1)=AMIN1(Y(1),AUXO)
0028          X(2)=AMAX1(X(2),AUX)
0029          Y(2)=AMAX1(Y(2),AUXO)
0030    10    CONTINUE
0031   C****
0032          IF(ABS(X(1))+ABS(Y(1)).GT.0.1)STOP1060
0033   C****
0034   C-----INITIALISATION DU TRACEUR
0035          CALL PLTLU(10)
0036          PAUSE 1
0037          LU=IGO(3)/100
0038          READ(LU,*)XL,YL
0039          X(2)=(X(2)-X(1))/XL
0040          Y(2)=(Y(2)-Y(1))/YL
0041   C-----"DO" SUR TOUS LES ELEMENTS
0042          DO1009 I=1,NE
0043          AUX1=0.1
0044          AUX3=0.
0045          AUX4=0.
0046          IF(IMAT(I))150,100,50
0047   C-----ELEMENTS DE LIAISON
0048    50    J=NPE(1,I)
0049          K=NPE(2,I)
0050          AUX=(JCOOR(1,J)+JCOOR(1,K))/(X(2)*2.)
0051          AUXO=(JCOOR(2,J)+JCOOR(2,K))/(Y(2)*2.)
0052          IF(IMAT(I).EQ.400)GOTO130
0053          T=IMAT(I)*3.141592/180
0054          IF(IMAT(I).EQ.200)T=0.
0055          CALL SYMB(AUX,AUXO,0.2,7,T,-1)
0056          AUX1=0.00
0057   C-----ELEMENTS EN ACIER
0058    100   DO 120 K=1,2
0059          AUX=JCOOR(1,NPE(K,I))/X(2)+AUX1
0060          AUXO=JCOOR(2,NPE(K,I))/Y(2)+AUX1
0061          CALL PLOT(AUX,AUXO,4-K)
0062          AUX3=AUX3+AUX*0.5
0063          AUX4=AUX4+AUXO*0.5
0064    120   CONTINUE
0065          GOTO1009
0066   C----ELEMENTS DE TRANSMISSION
0067    130   L=3
0068          DO140 K=1,3
0069          IF(K.EQ.2)GOTO133
0070          J=NPE((K+1)/2,I)
0071          AUX1=JCOOR(1,J)/X(2)
0072          AUX2=JCOOR(2,J)/Y(2)
0073          GOTO136
0074    133   AUX1=AUX-0.2
0075          AUX2=AUXO
0076          AUX3=AUX1
0077          AUX4=AUX2-0.2
0078    136   CALL PLOT(AUX1,AUX2,L)
```

```
0079          L=2
0080    140   CONTINUE
0081          GOTO1000
0082   C-----ELEMENTS EN BETON
0083    150   L=3
0084          DO 200 K=1,3
0085          M=NPE(1+MOD(K,3),I)
0086          IF(L.NE.3)GOTO170
0087          AUX=JCOOR(1,NPE(1,I))/X(2)
0088          AUXO=JCOOR(2,NPE(1,I))/Y(2)
0089          CALL PLOT(AUX,AUXO,L)
0090          L=2
0091    170   AUX=JCOOR(1,M)/X(2)
0092          AUXO=JCOOR(2,M)/Y(2)
0093          CALL PLOT(AUX,AUXO,L)
0094          AUX3=AUX3+AUX/3.
0095          AUX4=AUX4+AUXO/3.
0096    200   CONTINUE
0097          AUX3=AUX3-0.3
0098    1000   ASSIGN 1002 TO ILB
0099          GOTO1011
0100    1002   CALL SYMB(AUX3,AUX4,0.15,IASC,0.,J)
0101    1009   CONTINUE
0102   C-----ECRITURE DES NUMEROS DES POINTS NODAUX
0103          GOTO2001
0104    1012  DO2000 I=1,NP
0105          ASSIGN 1100 TO ILB
0106    1011   IF((I.GE.100).OR.(I.LT.10))GOTO1030
0107          CALL CODE
0108          WRITE(IASC,1010)I
0109    1010  FORMAT(I3)
0110          J=3
0111          GOTO ILB
0112    1030  CALL CODE
0113          WRITE(IASC,1040)I
0114    1040  FORMAT(I4)
0115          J=4
0116          IF(I.GT.9)GOTO ILB
0117          J=2
0118          IASC(1)=IASC(2)
0119          GOTO ILB
0120    1100   AUX=JCOOR(1,I)/X(2)-0.05
0121          AUXO=JCOOR(2,I)/Y(2)+0.10
0122          CALL SYMB(AUX,AUXO,0.15,IASC,0.,J)
0123    2000  CONTINUE
0124   C----RESTRICTIONS MOUVEMENTS
0125    2001  DO 2008 I=1,NR
0126          J=ILM(1,I)
0127          K=ILM(2,I)
0128          AUX=JCOOR(1,J)/X(2)
0129          AUXO=JCOOR(2,J)/Y(2)
0130          J=2
0131          AUX1=0.
0132          IF(K.EQ.10)AUX1=-90.
0133          IF(K.EQ.11)J=0
0134          CALL SYMB(AUX,AUXO,0.25,J,AUX1,-1)
0135    2008   CONTINUE
0136          CALL PLOT(0.,0.,3)
0137   C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0138          INAM(2)=2HF3
0139          IF(IABS(IGO(1)).EQ.2)INAM(2)=2HF7
0140          IF(IGO(1).EQ.3)INAM(2)=2H11
0141          IP(4)=0
0142   2010   CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0143          END
0144          END$
```

```
SELF3  T=00003 IS ON CR00040 USING 00016 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE: 20/ 4/78
0003          PROGRAM ELF3
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DE LA MATRICE RAIDEUR TANGENTE  *
0007   C*   DES ELEMENTS EN ACIER ET DE LIAISON.STOCKAGE DE CETTE MATRICE-CI *
0008   C*     DANS L,AIRE DU TRAVAIL DU DISQUE.                         *
0009   C*                                                               *
0010   C*****************************************************************
0011          DIMENSION IBUF(72),RK(6,6),IWO1(6),DBA(4),DBL(2,4),JBUF(36),IP(5)
0012          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0013         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0015         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0016         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0017          EQUIVALENCE (IBUF,RK),(DBA,JBUF),(DBL,JBUF),(LU1,IGO(4))
0018   C-----
0019   C-----
0020          CALL RMPAR(IP)
0021          CALL EXEC(2,18,INAM,-6)
0022   C-----INITIALISATION DES CONTROLES
0023          IWO(4)=IWO(1)+MXE+MXP
0024          IWO(5)=0
0025          IWO(6)=0
0026          DO10 I=1,6
0027    10    IWO1(I)=IWO(I)
0028          IWO1(4)=IWO1(4)+MXR
0029   C-----"DO"POUR TOUS LES ELEMENTS
0030          DO800I=1,NE
0031          IF(IMAT(I))20,50,200
0032   C-----ELEMENTS EN BETON
0033    20    CALL SWO(IWO,IWO,72)
0034          CALL SWO(IWO1,IWO1,36)
0035          GOTO 800
0036   C-----ELEMENTS EN ACIER
0037    50    IF(ABS(DEF(1,I)).LT.FA/EA)GOTO 80
0038   C-----ZONE PLASTIQUE
0039          DO 60 J=1,6
0040          DO 60 K=1,6
0041    60    RK(J,K)=0.
0042          DO 70 J=1,4
0043    70    DBA(J)=0.
0044          GOTO 700
0045   C-----ZONE ELASTIQUE
0046    80    I1=NPE(2,I)
0047          I0=NPE(1,I)
0048          AUX0=JCOOR(2,I1)-JCOOR(2,I0)
0049          AUX=JCOOR(1,I1)-JCOOR(1,I0)
0050          ALFA=ATAN(AUX0/AUX)
0051          IF(AUX.LT.0.)ALFA=ALFA+3.141592
0052          RL=SQRT(AUX**2+AUX0**2)
0053          IF(JCOOR(1,I1).EQ.JCOOR(1,I0))ALFA=SIGN(3.141592/2.,AUX0)
0054          AUX=NPE(3,I)*0.01*EA/RL
0055          CA=COS(ALFA)
0056          SA=SIN(ALFA)
0057          C2=CA*CA*AUX
0058          S2=SA*SA*AUX
0059          SC=SA*CA*AUX
0060          RK(1,1)=C2
0061          RK(1,2)=SC
0062          RK(1,3)=-C2
0063          RK(1,4)=-SC
0064          RK(2,2)=S2
0065          RK(2,3)=-SC
0066          RK(2,4)=-S2
0067          RK(3,3)=C2
0068          RK(3,4)=SC
0069          RK(4,4)=S2
0070          AUX=EA/RL*CA
0071          AUX0=EA/RL*SA
0072          DBA(1)=-AUX
0073          DBA(2)=-AUX0
0074          DBA(3)=AUX
0075          DBA(4)=AUX0
0076    90    DO 100 J=5,6
0077          DO 100 K=1,J
0078   100    RK(K,J)=0.
```

```
0079          DO 120 J=2,6
0080          DO 120 K=1,J-1
0081    120   RK(J,K)=RK(K,J)
0082          GOTO 700
0083  C-----ELEMENTS DE LIAISON(ACIER-BETON ET PAROIS-HOURDIS)
0084  200     IF(IMAT(I).NE.400)GOTO 210
0085          ALFA=0.
0086          AUX0=0.
0087          AUX1=1.E+08
0088          GOTO300
0089    210   ALFA=IMAT(I)/180.*3.141592
0090          IF(IMAT(I).EQ.200)ALFA=0.
0091          AUX=SQRT(FB)*HPE(3,I)
0092          AUX0=AUX*10.*13463.
0093          AUX1=9756.
0094          AUX2=ABS(DEF(1,I))
0095          IF(AUX2.GE.0.00041)AUX1=4010.
0096          IF(AUX2.GE.0.001)AUX1=2732.
0097          IF(AUX2.GE.0.002)AUX1=799.
0098          IF(AUX2.GE.0.00313)AUX1=0.
0099          AUX1=AUX*AUX1
0100  300     CA=COS(ALFA)
0101          SA=SIN(ALFA)
0102          C2=CA*CA
0103          S2=SA*SA
0104          SC=SA*CA
0105          RK(1,1)=C2*AUX1+S2*AUX0
0106          RK(1,2)=SC*(AUX1-AUX0)
0107          RK(1,3)=-RK(1,1)
0108          RK(1,4)=-RK(1,2)
0109          RK(2,2)=S2*AUX1+C2*AUX0
0110          RK(2,3)=RK(1,4)
0111          RK(2,4)=-RK(2,2)
0112          RK(3,3)=RK(1,1)
0113          RK(3,4)=RK(1,2)
0114          RK(4,4)=RK(2,2)
0115          DBL(1,1)=-AUX1*CA
0116          DBL(1,2)=-AUX1*SA
0117          DBL(1,3)=-DBL(1,1)
0118          DBL(1,4)=-DBL(1,2)
0119          DBL(2,1)=AUX0*SA
0120          DBL(2,2)=-AUX0*CA
0121          DBL(2,3)=-DBL(2,1)
0122          DBL(2,4)=-DBL(2,2)
0123          GOTO90
0124  C-----STOCKAGE DANS L,AIRE DE TRAVAIL DU DISQUE
0125    700   CALL BWR(2,IWO,IBUF,72)
0126          CALL BWR(2,IWO1,JBUF,36)
0127    800   CONTINUE
0128  C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0129          INAM(2)=2HF4
0130          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0131          END
0132          END$
```

```
ELF4  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

 001    FTN4
 002   C-----DATE:15/ 1/79
 003          PROGRAM ELF4
 004   C*****************************************************************
 005   C*                                                               *
 006   C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DE LA MATRICE RAIDEUR TANGENTE  *
 007   C*     DES ELEMENTS EN BETON.STOCKAGE SUR L,AIRE DE TRAVAIL DU DISQUE *
 008   C*                                                               *
 009   C*****************************************************************
 010          DIMENSION JBUF(36),IBUF(72),RK(6,6),D(3,3),E(3),ER(3),V(2),
 011         CTD(3,3),T(3,3),B(3,6),DB(3,6),BT(6,3),IWO1(6),IP(5)
 012          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
 013         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
 014         CNC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
 015         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
 016         CJCDOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
 017          EQUIVALENCE (IBUF,RK),(DB,JBUF),(LU1,IGO(4))
 018   C-----
 019   C-----
 020          CALL RMPAR(IP)
 021          CALL EXEC(2,1B,INAM,-6)
 022   C-----INITIALISATION DES CONTROLES
 023          IWO(4)=IWO(1)+MXE+MXP
 024          IWO(5)=0
 025          IWO(6)=0
 026          DO5 I=1,6
 027    5     IWO1(I)=IWO(I)
 028          IWO1(4)=IWO1(4)+MXR
 029   C****
 030          IF(VU.NE.0.2)STOP1170
 031   C****
 032   C-----"DO"POUR TOUS LES ELEMENTS
 033          DO2000 I=1,NE
 034          IF(IMAT(I))20,10,10
 035   C-----ELEMENTS EN ACIER ET DE LIAISON
 036    10    CALL SWO(IWO,IWO,72)
 037          CALL SWO(IWO1,IWO1,36)
 038          GOTO 2000
 039   C-----ELEMENTS EN BETON
 040   C-----OBTENTION DE LA MATRICE (D) TANGENTE
 041    20    IF(IMAT(I).LT.-1)GOTO 200
 042   C-----BETON NON FISSURE
 043   C-----OBTENTION DE "ALFA" POUR LES DIRECTIONS PRINCIPALES
 044          CALL CPRIN(TENS(1,I),TENS(2,I),TENS(3,I),T1,T2,ALFA,IMAT(I))
 045          C2=COS(ALFA)**2
 046          S2=SIN(ALFA)**2
 047          SC=SIN(ALFA)*COS(ALFA)
 048   C---- T2)=T1(VALEUR ARITMETIQUE) ALFA CORRESPOND A T1
 049          IF(T1.LE.T2)GOTO 30
 050          J=-1
 051          IF(ALFA.LE.0.)J=1
 052          ALFA=ALFA+3.141592/2.*J
 053          AUX=S2
 054          S2=C2
 055          C2=AUX
 056          SC=-SC
 057          AUX=T1
 058          T1=T2
 059          T2=AUX
 060   30     E(1)=EB
 061          E(2)=EB
 062          V(1)=VU
 063          V(2)=VU
 064          IF((T1.EQ.0.).AND.(T2.EQ.0.))GOTO100
 065          IF(ABS(T2/T1).LT.0.01)T2=0.01*T1
 066          A=T2/T1
 067          IF(T1.EQ.0.)A=1.E+20
 068          IF((T1.GE.0.).AND.(T2.GE.0.))GOTO60
 069          IF(A.GE.-0.50)GOTO50
 070   C-----DOMAINE LINEAIRE
 071   60     V(1)=VU*(0.9-0.05/A)
 072          IF(A.GT.0.)V(1)=0.9*VU
 073          V(2)=V(1)
 074          GOTO 100
 075   C-----DOMAINE NON LINEAIRE
 076   80     CALL ROT(T1,T2,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
 077          E(1)=C2*DEF(1,I)+S2*DEF(2,I)+SC*DEF(3,I)
 078          E(2)=S2*DEF(1,I)+C2*DEF(2,I)-SC*DEF(3,I)
```

```
079          E(3)=2*SC*(DEF(2,I)-DEF(1,I))+(C2-S2)*DEF(3,I)
080          IF(ABS(E(3)).GT.1.E-06)WRITE(LU1,81)I,ALFA,E(1),E(2),E(3)
081   81     FORMAT(/X,"EXY#0:"3X"EL:"I5,4X"ALF:"F10.6"DEF.PRINC.(X,Y,XY):"
082         C3(E10.4,4X))
083          EBJ=EB/(1.-YU*A)
084          AUX=-EB/(YU*(1.+A))
085          AUX0=T1/AUX
086   85     AUX2=AUX0/ER(3)
087          AUX3=1.+(AUX*ER(3)/SR1-1.-GA+AUX2*GA)*AUX2
088          AUX4=T1-AUX*AUX0/AUX3
089          IF(ABS(AUX4).LE.ABS(T1)*0.00001)GOTO86
090   C****
091          IF(AUX4.GT.0.)STOP1773
092   C****
093          AUX0=AUX0+AUX4/(AUX*(1.-GA*AUX2**2)/AUX3**2)
094          GOTO85
095   86     E(3)=AUX0
096          IF(I.EQ.0)WRITE(6,3)I,A,T1,SR1,E,ER
097    3      FORMAT(I4,9E12.5)
098          DO 90 J=1,3
099          AUX0=AMIN1(1.,E(J)/ER(J))
100          E(J)=EBJ*(1.-GA*AUX0**2)/(1.+(EBJ*ER(J)/SR1
101         C-1.-GA)*AUX0+GA*AUX0**2)**2
102          IF((J.EQ.1).AND.(A.EQ.YU))J=2
103          IF(J.EQ.1)EBJ=EB/(A-YU)
104          IF(J.EQ.2)EBJ=-EB/(YU*(1.+A))
105    90    CONTINUE
106          Y(1)=E(1)/(E(1)*A-E(3)*(1.+A))
107          E(1)=-Y(1)*E(3)*(1.+A)
108          IF(A.EQ.YU)GOTO95
109          Y(2)=E(2)*A/(E(2)-E(3)*(1.+A))
110          E(2)=-Y(2)*E(3)*(1.+A)
111          GOTO100
112   95     Y(2)=A
113          E(2)=E(1)*A/Y(1)
114   C-----MATRICE(D) ORTHOTROPE REPEREE AUX DIRECTIONS PRINCIPALES
115   C-----DES CONTRAINTES
116    100   AUX=E(1)/(1.-Y(1)*Y(2))
117          D(1,1)=AUX
118          D(1,2)=AUX*Y(2)
119          D(1,3)=0
120          D(2,2)=AUX*Y(2)/Y(1)
121          D(2,3)=0.
122          D(3,3)=E(1)/(1.+2.*Y(1)+Y(1)/Y(2))
123          DO 120 J=2,3
124          DO 120 K=1,J-1
125    120   D(J,K)=D(K,J)
126   C-----PASSAGE AU SYSTEME DE REFERENCE GLOBAL
127    130   T(1,1)=C2
128          T(1,2)=S2
129          T(1,3)=-2*SC
130          T(2,1)=S2
131          T(2,2)=C2
132          T(2,3)=2*SC
133          T(3,1)=SC
134          T(3,2)=-SC
135          T(3,3)=C2-S2
136          CALL PMM(T,D,3,3,3,TD)
137          CALL PMMT(TD,T,3,3,3,D)
138          GOTO 400
139   C-----BETON FISSURE EN DEUX DIRECTIONS
140    200   DO 210 J=1,3
141          DO210 K=1,3
142    210   D(J,K)=0.
143          IF(IMAT(I).GT.-3000)GOTO250
144          ALFA=(-IMAT(I)-3000)/10.
145           IF(IMAT(I).LT.-3900)ALFA=ALFA-180.
146          ASSIGN 240 TO ILB
147    220   ALFA=ALFA*3.141592/180.
148          C2=COS(ALFA)**2
149          S2=SIN(ALFA)**2
150          SC=SIN(ALFA)*COS(ALFA)
151          GOTO ILB
152   240    AUX0=C2*DEF(1,I)+S2*DEF(2,I)+SC*DEF(3,I)
153          DO245 III=1,2
154          IF(AUX0.GE.0.64*FB**(2./3.)/EB)GOTO244
155          D(III,III)=EB
156          WRITE(LU1,251)I,AUX0
157          WRITE(LU1,243)III
158   243    FORMAT(" FISSURE"I2)
```

```
244     AUX0=S2*DEF(1,I)+C2*DEF(2,I)-SC*DEF(3,I)
245     CONTINUE
        GOTO 130
C-----BETON FISSURE EN UNE DIRECTION
250     ALFA=(-IMAT(I)-1000)/10.
        IF(IMAT(I).LT.-1900)ALFA=ALFA-180.
        ASSIGN 260 TO ILB
        GOTO 220
 260    T2=S2*TENS(1,I)+C2*TENS(2,I)-2.*SC*TENS(3,I)
        AUX0=C2*DEF(1,I)+S2*DEF(2,I)+SC*DEF(3,I)
        IF(AUX0.GE.0.64*FB**(2./3.)/EB)GOTO262
C****
        D(1,1)=EB
        WRITE(LU1,251)I,AUX0
 251    FORMAT(//"  ATTENTION....FISSURE FERMEE!!!...ELEMENT"I5,
       C3X"AUX0="E12.4)
 262     CONTINUE
C****
        IF(AUX0.LT.0.004)D(3,3)=0.15*EB*(1.-AUX0/0.004)
        D(2,2)=EB
        IF(T2.GE.0.)GOTO 130
        SR1=-FB
        ER(2)=-0.00218
        E(2)=S2*DEF(1,I)+C2*DEF(2,I)-SC*DEF(3,I)
C****
        IF(E(2).GE.0.)STOP1176
C****
        AUX0=E(2)/ER(2)
C****
        IF(EB*ER(2)/SR1-2..LT.0.)STOP1174
C****
        D(2,2)=EB*(1.-AUX0**2)/(1.+(EB*ER(2)/SR1-2.)*AUX0
       C+AUX0**2)**2
        GOTO 130
C-----FORMATION DE LA MATRICE RAIDEUR
 400    CALL MATB(NPE(1,I),NPE(2,I),NPE(3,I),JCOOR,B,AREA)
        CALL PMM(D,B,3,3,6,DB)
        CALL MTR(B,3,6,BT)
        CALL PMM(BT,DB,6,3,6,RK)
        AUX=ESP*AREA
        DO 500 J=1,6
        DO 500 K=1,6
 500    RK(J,K)=RK(J,K)*AUX
C-----STOCKAGE DANS L,AIRE DE TRAVAIL DU DISQUE
        CALL BWR(2,IWO,IBUF,72)
        CALL BWR(2,IWO1,JBUF,36)
 2000   CONTINUE
C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
        INAM(2)=2HF5
        CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
        END
C----
C-----
C-----SUBROUTINE "MATB" POUR LA FORMATION DE LA MATRICE "B"
        SUBROUTINE MATB(I,J,K,JCOOR,B,AREA)
        DIMENSION JCOOR(2,1),B(3,6)
        XI=JCOOR(1,I)
        YI=JCOOR(2,I)
        XJ=JCOOR(1,J)
        YJ=JCOOR(2,J)
        XK=JCOOR(1,K)
        YK=JCOOR(2,K)
        AREA=0.5*(XJ*YK+XI*YJ+XK*YI-(XJ*YI+XK*YJ+XI*YK))
C****
        IF(AREA.LE.0.)STOP27
C****
        AUX=2.*AREA
        BI=(YJ-YK)/AUX
        BJ=(YK-YI)/AUX
        BK=(YI-YJ)/AUX
        CI=(XK-XJ)/AUX
        CJ=(XI-XK)/AUX
        CK=(XJ-XI)/AUX
        B(1,1)=BI
        B(1,2)=0.
        B(1,3)=BJ
        B(1,4)=0.
        B(1,5)=BK
        B(1,6)=0.
        B(2,1)=0.
```

```
      B(2,2)=CI
      B(2,3)=0.
      B(2,4)=CJ
      B(2,5)=0.
      B(2,6)=CK
      B(3,1)=CI
      B(3,2)=BI
      B(3,3)=CJ
      B(3,4)=BJ
      B(3,5)=CK
      B(3,6)=BK
      END
C----
C-----SUBROUTINE "PMM" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)=(C)
C-----
      SUBROUTINE PMM(A,B,N1,N2,N3,C)
      DIMENSION A(N1,N2),B(N2,N3),C(N1,N3)
      DO 20 I=1,N1
      DO 20 K=1,N3
      Z=0.
      DO 10 L=1,N2
 10   Z=Z+A(I,L)*B(L,K)
 20   C(I,K)=Z
      END
C-----
C-----SUBROUTINE "PMMT" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)T=(C)
C-----
      SUBROUTINE PMMT(A,B,N1,N2,N3,C)
      DIMENSION A(N1,N2),B(N3,N2),C(N1,N3)
      DO 20 I=1,N1
      DO 20 K=1,N3
      Z=0.
      DO 10 L=1,N2
 10   Z=Z+A(I,L)*B(K,L)
 20   C(I,K)=Z
      END
C-----
C-----SUBROUTINE "MTR" POUR OBTENIR (C)=(A)T
C-----
      SUBROUTINE MTR(A,N1,N2,C)
      DIMENSION A(N1,N2),C(N2,N1)
      DO 10 I=1,N1
      DO 10 K=1,N2
 10   C(K,I)=A(I,K)
      END
C-----
C-----SUBROUTINE "CPRIN" POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES PRINCIPALES
C-----
      SUBROUTINE CPRIN(TX,TY,TXY,T1,T2,ALFA,IMAT)
      T1=0.
      T2=0.
      ALFA=0.
      IF(IMAT.GE.0)RETURN
      IF(TX.EQ.TY)GOTO5
      ALFA=0.5*ATAN(2.*TXY/(TX-TY))
      GOTO 10
5     ALFA=0.5*SIGN(3.141592/2.,TXY)
      IF(TXY.EQ.0.)ALFA=0.
 10   C2=COS(ALFA)**2
      S2=SIN(ALFA)**2
      SC=SIN(ALFA)*COS(ALFA)
      T1=C2*TX+S2*TY+2*SC*TXY
      T2=S2*TX+C2*TY-2*SC*TXY
      END
C----
C-----SUBROUTINE "ROT" POUR OBTENIR LES CONTRAINTES ET DEFORMATIONS
C-----EN RUPTURE
C----
      SUBROUTINE ROT(T1,T2,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
      DIMENSION ER(3),D(13),E(3,13)
      DATA D/1.,.82,.64,.525,.2,.13,0.,-.052,-.07,-.103,-.204,-.35,-.5
     C/,E/-2.6,-2.6,3.39,-2.88,-1.96,3.12,-3.,-1.33,2.5,
     C-3.08,-0.76,1.96,-3.15,0.,1.64,-3.,0.53,1.33,
     C-2.18,0.8,0.8,-1.43,0.6,0.28,-1.23,0.49,.22,
     C-0.85,0.29,0.14,-0.46,0.19,0.052,-0.315,0.17,0.04,
     C-0.13959,0.12065,0.017235/
      A=T2/T1
      VU=0.2
C-----CONTROLE T1<=T2 ; T1<0; A>-0.5
C****
```

```
      IF(T1.GT.T2)STOP31
C****
      IF(A.LT.-0.50001)STOP33
C****
      IF(T1.GE.0.)STOP34
C****
C----OBTENTION CONTRAINTE RUPTURE SR1
      AUX0=FB**(1./3.)
      IF(A.GT.-1./15.)GOTO10
      SR1=0.64*FB/(A*AUX0-0.366157)
      GOTO20
 10   AUX=3.65
      IF(A.LT.0.)AUX=(15.*AUX0-43.05468)/(AUX0+5.49236)
      SR1=-(1.+AUX*A)*FB/(1.+A)**2
C----OBTENTION DEFORMATIONS EN RUPTURE
20    GA=AMAX1(0.,AMIN1(1.,1.+10.*A))
      RM=FRM(A)
      DO30 I=1,13
      IF(A.GT.D(I))GOTO40
30    CONTINUE
      I=13
40    IF(I.EQ.1)STOP36
C****
      RM0=FRM(D(I-1))
      RM1=FRM(D(I))
      DO60 J=1,3
      ER(J)=E(J,I-1)+(E(J,I)-E(J,I-1))/(RM1-RM0)*(RM-RM0)
      ER(J)=ER(J)*1.E-03
60    CONTINUE
      AUX=EB/(1.-VU*A)
      DO90 J=1,3
      AUX0=AUX*ER(J)/SR1-1.-GA
      IF(AUX0.GE.0.)GOTO80
      AUX2=ER(J)
      AUX0=AUX0+1.+GA
      ER(J)=(1.+GA)*SR1/AUX
80    IF((J.EQ.1).AND.(A.EQ.VU))J=2
      IF(J.EQ.1)AUX=EB/(A-VU)
      IF(J.EQ.2)AUX=-EB/(VU*(1.+A))
90    CONTINUE
      END
C----
C---- FONCTION FRM
C----
      FUNCTION FRM(A)
      FRM=-1.
      IF(A.LT.0.)FRM=3.
      PI=3.141592
      B=A
      IF(A.EQ.0.)B=1.E-20
      FRM=(ATAN(1./B)+FRM*PI/4.)/PI*6.4
      END
      END$
```

```
SELF5  T=00003 IS ON CR00040 USING 00015 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C-----DATE: 20/ 4/78
0003         PROGRAM ELF5
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LA FORMATION ET LE STOCKAGE                *
0007   C*     DE LA MATRICE RAIDEUR TANGENTE GLOBALE.                   *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010         DIMENSION IWO1(6),IWO2(6),KBUF(6000),ISP(30,200),IBUF(72)
0011        C,RK(6,6),JBUF(240),SK(120),IEL(400),IWO3(6),IP(5)
0012         COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0013        CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014        CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0015        CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0016        CJCOOR(2,400),CHARG(500),DEPL(600),ILM(2,100)
0017         EQUIVALENCE (KBUF,ISP),(IBUF,RK),(JBUF,SK)
0018   C-----
0019   C-----
0020         CALL RMPAR(IP)
0021         CALL EXEC(2,18,INAM,-6)
0022   C-----MISE A ZERO DES CONTROLES "ISP" STOCKES DANS L,AIRE DE TRAVAIL
0023   C-----'NN' EST LE NOMBRE PLUS GRAND DE FILES DU VECTEUR 'ISP'
0024   C-----QUI EST ADMIS EN MEMOIRE
0025   C----
0026         NN=200
0027   C----
0028         DO10 I=1,3
0029         IWO1(I)=IWO(I)
0030    10   IWO2(I)=IWO(I)
0031         IWO2(4)=IWO2(1)+MXE
0032         IWO2(5)=0
0033         IWO2(6)=0
0034         IWO3(4)=IWO2(4)
0035         DO30 I=1,NN
0036         DO30 J=2,30
0037   30    ISP(J,I)=0
0038         DO 100 I=1,NP
0039         K=MOD(I-1,NN)+1
0040         ISP(1,K)=I
0041         IEL(I)=0
0042         IF((MOD(I,NN).NE.0).AND.(I.NE.NP))GOTO100
0043         CALL BWR(2,IWO2,KBUF,30*K)
0044    100  CONTINUE
0045         IWO2(4)=IWO3(4)
0046         IWO2(5)=0
0047         IWO2(6)=0
0048         JN=0
0049         DO110 I=1,6
0050    110  IWO3(I)=IWO2(I)
0051         NF=NP/NN
0052         IF(MOD(NP,NN).NE.0)NF=NF+1
0053         DO450 IN=1,NF
0054         CALL BWR(1,IWO2,KBUF,30*MINO(NN,NP-JN))
0055         IWO(4)=IWO(1)+MXE+MXP
0056         IWO(5)=0
0057         IWO(6)=0
0058   C-----"DO" POUR TOUS LES ELEMENTS
0059         DO400 I=1,NE
0060         ND=2
0061         IF(IMAT(I).LT.0)ND=3
0062         KN=0
0063         IO=0
0064   C-----OBTENTION DE LA LIGNE ET LA COLONNE DE LA MATRICE RAIDEUR GLOBALE
0065         DO 350 J=1,ND
0066         JO=NPE(J,I)
0067         IF((JO.LE.JN).OR.(JO.GT.JN+NN))GOTO345
0068         IF(KN.EQ.0)CALL BWR(1,IWO,IBUF,72)
0069   C-----LECTURE DES LIGNES DE LA MATRICE RAIDEUR COMPACTE GLOBALE
0070   C-----QUI EST EMMAGASINEE DANS L,AIRE DE TRAVAIL DU DISQUE
0071         IF(IEL(JO).EQ.0)GOTO200
0072         IWO1(4)=IWO1(1)
0073         IWO1(5)=0
0074         IWO1(6)=0
0075         DO150 M=1,3
0076         CALL SWO(IWO1,IWO1,80*(JO-1))
0077    150  CONTINUE
0078         CALL BWR(1,IWO1,JBUF,240)
```

```
0079          GOTO230
0080    200   IEL(JO)=1
0081          DO 210 M=1,120
0082    210    SK(M)=0.
0083   230    IO=IO+1
0084           I1=0
0085          DO330 L=1,ND
0086          I1=I1+1
0087          IF(JO.GT.NPE(L,I))GOTO329
0088   C-----OBTENTION PREMIER ISP(N,I)VIDE POUR Y STOCKER LE NUMERO DU NOEUD
0089   C-----DANS LA MATRICE GLOBALE DONT LES TERMES SONT EMMAGASINNES
0090   C-----DANS LES COLONNES 'N' ET 'N+1' DE LA MATRICE GLOBALE COMPACTE
0091          DO310 N=1,30
0092          IF(ISP(N,JO-JN)-NPE(L,I))305,320,305
0093   305    IF(ISP(N,JO-JN))308,315,310
0094   C****
0095    308   STOP 1201
0096   C****
0097    310   CONTINUE
0098   C****
0099          STOP 1205
0100   C****
0101   315    ISP(N,JO-JN)=NPE(L,I)
0102   C-----ACCUMULATION DE LA RAIDEUR ELEMENTALE
0103   C-----SUR LA MATRICE RAIDEUR COMPACTE
0104   320    DO325 K=0,1
0105          I2=60*K
0106          SK(I2+2*N-1)=SK(I2+2*N-1)+RK(IO+K,I1)
0107          SK(I2+2*N)=SK(I2+2*N)+RK(IO+K,I1+1)
0108   325     CONTINUE
0109   329    I1=I1+1
0110    330   CONTINUE
0111          IO=IO+1
0112          KN=1
0113          IWO1(4)=IWO1(1)
0114          IWO1(5)=0
0115          IWO1(6)=0
0116          DO340 M=1,3
0117          CALL SWO(IWO1,IWO1,80*(JO-1))
0118   340    CONTINUE
0119          CALL BWR(2,IWO1,JBUF,240)
0120          GOTO 350
0121    345   IO=IO+2
0122    350   CONTINUE
0123   399    IF(KN EQ.0)CALL SWO(IWO,IWO,72)
0124    400   CONTINUE
0125          CALL BWR(2,IWO3,KBUF,30*MINO(NN,NP-JN))
0126          JN=JN+NN
0127    450   CONTINUE
0128   C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0129          INAM(2)=2HF6
0130          CALL EXEC(IO,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0131          END
0132          END$
```

```
SELF6  T=00003 IS ON CR00040 USING 00013 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE: 15/1/79
0003          PROGRAM ELF6
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,INTRODUCTION DES CONDITIONS AUX LIMITES.  *
0007   C*     S'IL S,AGIT DE LA TERMINAISON,POSSIBILITE DE STOCKAGE DE   *
0008   C*     CERTAINES VALEURS SUR UN FICHIER, POUR UNE POSTERIEURE     *
0009   C*     LECTURE,LORS D,UN NOUVEAU PASSAGE DU PROGRAMME.            *
0010   C*                                                               *
0011   C*****************************************************************
0012          DIMENSION KBUF(6144),RBUF(3072),IWO1(6),SK(120),TBUF(1800),
0013         CDBUF(1800),IP(5)
0014          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0015         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0016         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0017         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0018         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0019          EQUIVALENCE(KBUF,RBUF),(KBUF,SK),(TENS,TBUF),(DEF,DBUF)
0020   C-----
0021   C-----
0022          CALL RMPAR(IP)
0023          CALL EXEC(2,1B,INAM,-6)
0024   C-----INTRODUCTION DES CONDITIONS AUX LIMITES
0025          IWO1(1)=IWO(1)
0026          IWO1(2)=IWO(2)
0027          IWO1(3)=IWO(3)
0028          DO 500 I=1,NR
0029          IF(ITER.NE.1)GOTO411
0030          IWO1(4)=IWO1(1)
0031          IWO1(5)=0
0032          IWO1(6)=0
0033          DO150 L=1,3
0034          CALL SWO(IWO1,IWO1,80*(ILM(1,I)-1))
0035   150    CONTINUE
0036          DO 410 J=4,6
0037   410    IWO(J)=IWO1(J)
0038          CALL BWR(1,IWO1,KBUF,240)
0039   C-----EXAMEN DES RESTRICTIONS POSSIBLES DANS LES DEUX SENS
0040   411    I2=ILM(2,I)/10
0041          DO490 J=1,2
0042          IF(I2)415,450,420
0043   C****
0044   415    STOP 1401
0045   C****
0046   420    IF(ITER.EQ.1)SK(60*(J-1)+J)=SK(60*(J-1)+J)*1.E+20
0047          CHARG(2*(ILM(1,I)-1)+J)=0.
0048   450    I2=MOD(ILM(2,I),10)
0049   490    CONTINUE
0050          IF(ITER.NE.1)GOTO500
0051          CALL BWR(2,IWO,KBUF,240)
0052   500    CONTINUE
0053          IF(ITER.NE 1)GOTO990
0054   C----STOCKAGE DE (KT),(ISP),(DB),"IMAT","FIS","CHARG","TENS" ET "DEF" DANS
0055   C-----LE FICHIER "IFIL" DU DISQUE
0056   600    NM=1
0057          NN=6144
0058          NS=NM*MXE
0059          ASSIGN 700 TO ILB
0060          K=0
0061          I=0
0062   610    IWO(4)=IWO(1)+I
0063          IWO(5)=0
0064          IWO(6)=0
0065          DO 640 J=1,NS
0066          CALL BWR(1,IWO,KBUF,NN)
0067          CALL EXEC(15,102B,KBUF,NN,IFIL,K)
0068          K=K+NN/128
0069   640    CONTINUE
0070          GOTO ILB
0071   700    ASSIGN 710 TO ILB
0072          I=MXE
0073          NS=NM*MXP
0074          GOTO 610
0075   710    ASSIGN 715 TO ILB
0076          I=MXE+MXP+MXR
0077          NS=NM*(1+IFIX(NE*36 /6144.))
0078          GOTO 610
```

```
0079   715   NS=NE
0080         ILB=0
0081   720   I2=0
0082         ILB=ILB+1
0083   730   J=MIN0(NS,NN)
0084         DO780 I1=1,J/MIN0(2,ILB)
0085         GOTO(740,742,745,750,760),ILB
0086  740    KBUF(I1)=IMAT(I2+I1)
0087         GOTO780
0088  742    RBUF(I1)=FIS(I2+I1)
0089         GOTO780
0090   745   RBUF(I1)=CHARG(I2+I1)
0091         GOTO 780
0092   750   RBUF(I1)=TBUF(I2+I1)
0093         GOTO780
0094   760   RBUF(I1)=DBUF(I2+I1)
0095   780   CONTINUE
0096         I2=I2+J/MIN0(2,ILB)
0097         CALL EXEC(15,102B,KBUF,J,IFIL,K)
0098         K=K+J/128
0099         IF(MOD(J,128).NE.0)K=K+1
0100         NS=NS-J
0101         IF(NS.GT.0)GOTO 730
0102         GOTO(784,785,790,790,800),ILB
0103  784    NS=2*NE
0104         GOTO720
0105  785    NS=4*NP
0106         GOTO720
0107  790    NS=6*NE
0108         GOTO 720
0109  C-----TERMINAISON DU PROGRAMME
0110  C****
0111  800    IF(JC.GT.NC)STOP1444
0112  C****
0113  C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0114   990   INAM(2)=2HF7
0115         CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0116   9999  END
0117         END$
```

```
ELF7  T=00003 IS ON CR00040 USING 00011 BLKS R=0000

0001  FTN4
0002  C----DATE: 21/ 4/78
0003        PROGRAM ELF7
0004  C*****************************************************************
0005  C*                                                               *
0006  C*     PROGRAMME POUR LA RESOLUTION DU SYSTEME PAR UNE           *
0007  C*     METHODE D'ELIMINATION.(COMMENCEMENT).                     *
0008  C*                                                               *
0009  C*****************************************************************
0010        DIMENSION RBUF(120),IMET(30),IP(5),IW01(6)
0011       C,KSP(30,200),JBUF(6144)
0012        COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0013       CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014       CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0015       CHPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0016       CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0017        EQUIVALENCE (JBUF,KSP),(RBUF,JBUF(101)),(LU1,IGO(4))
0018  C-----
0019  C-----
0020        CALL RMPAR(IP)
0021        CALL EXEC(2,1B,INAM,-6)
0022  C-----EGALISATION DEPL=CHARG
0023        DO10 I=1,2*NP
0024   10   DEPL(I)=CHARG(I)
0025        DO12 I=1,3
0026   12   IW01(I)=IWO(I)
0027  C-----LORS DE LA PREMIERE ITERATION , ON REDEFINIT LE VECTEUR ISP
0028  C-----
0029        IF(ITER.EQ.1)GOTO20
0030   15   IWO(4)=IWO(1)
0031        IWO(5)=0
0032        IWO(6)=0
0033        IW01(4)=IWO(2)-MXE+1
0034        IW01(5)=0
0035        IW01(6)=0
0036        DO18I=1,MXE
0037        CALL BWR(1,IWO,JBUF,6144)
0038        CALL BWR(2,IW01,JBUF,6144)
0039   18   CONTINUE
0040        INAM(2)=2H70
0041        CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0042        GOTO9999
0043   20   NN=200
0044        NT=30
0045        IWO(4)=IWO(1)+MXE
0046        IWO(5)=0
0047        IWO(6)=0
0048        DO25 I=4,6
0049   25   IW01(I)=IWO(I)
0050        IO=0
0051        DO340 N=1,NP
0052        IF(MOD(N,NN).NE.1)GOTO50
0053        KO=30*MIN0(NN,NP-IO)
0054        CALL BWR(1,IWO,JBUF,KO)
0055        IF(N.NE.1)GOTO50
0056        DO220 M=1,NT
0057    220 IMET(M)=KSP(M,1)
0058        GOTO340
0059   50    DO280 M=2,NT
0060        IF(IMET(M).EQ.0)GOTO300
0061        DO240 L=1,NT
0062        IF(KSP(L,N-IO).EQ.0)GOTO260
0063        IF(KSP(L,N-IO).EQ.IMET(M))GOTO280
0064  240   CONTINUE
0065        WRITE(LU1,250)N,IMET,(KSP(L,N-IO),L=1,NT)
0066   250   FORMAT(/X"'ISP' PLEIN,P.NODAL:"I5/X"IMET:"/3(10I5,/)X
0067       C"KSP:"/3(10I5,/))
0068  C****
0069        STOP1601
0070  C****
0071  260   KSP(L,N-IO)=IMET(M)
0072  280   CONTINUE
0073  300   DO320 M=1,NT
0074  320   IMET(M)=KSP(M,N-IO)
0075        IF((MOD(N,NN).NE.0) AND (N.NE.NP))GOTO340
0076        CALL BWR(2,IW01,JBUF,KO)
0077        IO=IO+NN
0078  340   CONTINUE
```

```
0079          GOTO15
0080   9999   END
0081          END$
```

```
SEL70  T=00003 IS ON CR00040 USING 00023 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE: 15/1/79
0003          PROGRAM EL70
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LA RESOLUTION DU SYSTEME PAR UNE           *
0007   C*     METHODE D'ELIMINATION.                                    *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION RBUF(120,25),ISP(30,25),JBUF(750),
0011         CIP(5),IMET(400),SBUF(120),TEMP(2),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6)
0012         C,LSP(30),TBUF(120),IHEUR(5)
0013          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0014         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0015         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0016         CMPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0017         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0018          EQUIVALENCE (TBUF,JBUF),(JBUF,ISP),(LU1,IGO(4))
0019   C-----
0020   C-----
0021          CALL RMPAR(IP)
0022   C-----
0023          CALL EXEC(2,1B,INAM,-6)
0024   C----
0025   C-----
0026          NT=30
0027          NN=25
0028   C-----
0029   361    IWO(4)=IWO(2)-MXE+1
0030          IWO(5)=0
0031          IWO(6)=0
0032          DO360 I=1,6
0033          IWO1(I)=IWO(I)
0034          IWO2(I)=IWO(I)
0035   360    IWO3(I)=IWO(I)
0036          IWO3(4)=IWO3(1)+MXE
0037          IL=0
0038          LL=-1
0039          IJK=1
0040          ASSIGN 369 TOILB
0041   C----BOUCLE SUR LES EQUATIONS
0042          DO520 I=1,2*NP
0043          IF(I.EQ.2*NP)GOTO501
0044          IJK=1-IJK
0045          II=60*IJK
0046          IF(IJK.EQ.1)GOTO364
0047   C---LECTURE SBUF,LSP POUR CHAQUE NOEUD
0048          JJ=(I+1)/2
0049          J=((JJ-1)/NN)*NN
0050          IF(LL.NE.J)GOTO362
0051          DO359 K=1,120
0052    359   SBUF(K)=RBUF(K,JJ-LL)
0053          CALL SWO(IWO1,IWO1,240)
0054          GOTO363
0055   362    CALL BWR(1,IWO1,SBUF,240)
0056   363    CALL BWR(1,IWO3,LSP,30)
0057   364    AUX=SBUF(II+1+IJK)
0058          IF(ABS(AUX).LT.1.E-10)GOTO3300
0059          DEPL(I)=DEPL(I)/AUX
0060   C---BOUCLE SUR LES LIGNES A ELIMINER
0061          LLO=LL
0062          DO470 ICOD=0,1
0063          DO460 M=1+ICOD,NT
0064          IF((M.EQ.1).AND.(IJK.EQ.1))GOTO460
0065          IN=LSP(M)
0066          IF(IN)365,470,365
0067   365    IL=((IN-1)/NN)*NN
0068          IF(M.EQ.1)GOTO369
0069          IF(LL.EQ.-1)GOTO368
0070          IF(ICOD.EQ.1)GOTO390
0071          IF(IL.NE.LLO)GOTO460
0072          GOTO369
0073   390    IF(IL.EQ.LLO)GOTO460
0074          IF(IL.EQ.LL)GOTO369
0075          N=2
0076   368    IWO(4)=IWO(2)-MXE+1
0077          IWO(5)=0
0078          IWO(6)=0
```

```
0079          DO367 LKK=1,3
0080          CALL SWO(IWO,IWO,80*LL)
0081    367   CONTINUE
0082          CALL BWR(N,IWO,RBUF,240*MINO(NP-LL,NN))
0083          IF(N.EQ.1)GOTOILB
0084   368    IWO(4)=IWO(1)+MXE
0085          IWO(5)=0
0086           IWO(6)=0
0087          CALL SWO(IWO,IWO,30*IL)
0088          CALL BWR(1,IWO,ISP,30*MINO(NP-IL,NN))
0089          IF(LL.EQ.-1)LLO=IL
0090          M=1
0091           LL=IL
0092          GOTO366
0093   C---RECHERCHE DES LIGNES APPROPIEES
0094   369    DO380 N=1,NT
0095          IA=ISP(N,IN-LL)
0096          IF(M.EQ.1)IA=LSP(N)
0097          IF(IA)370,400,370
0098   370    IMET(IA)=N
0099   380    CONTINUE
0100   400    DO405 N=-1,0
0101    405   TEMP(2+N)=SBUF(II+2*M+N)/AUX
0102   C----BOUCLE SUR LES COLONNES A ELIMINER
0103          DO420 N=1,NT
0104          IA=LSP(N)
0105          IF(IA)406,440,406
0106   406    IF(IA-IN)420,410,410
0107   410    IM=IMET(IA)
0108          DO416 JJ=0,1
0109          IF((M.EQ.1).AND.(JJ.EQ.0))GOTO416
0110          DO415 J=-1,0
0111          K=60*JJ+2*IM+J
0112          IF(M.EQ.1)GOTO414
0113          RBUF(K,IN-LL)=RBUF(K,IN-LL)-TEMP(JJ+1)*SBUF(II+2*N+J)
0114          GOTO415
0115   414    SBUF(K)=SBUF(K)-TEMP(JJ+1)*SBUF(2*N+J)
0116   415    CONTINUE
0117   416    CONTINUE
0118   420    CONTINUE
0119   C---MODIF.DU VECTEUR CHARG.
0120   440    DEPL(2*IN)=DEPL(2*IN)-DEPL(I)*SBUF(II+2*M)
0121          IF(M.NE.1)DEPL(2*IN-1)=DEPL(2*IN-1)-DEPL(I)*SBUF(II+2*M-1)
0122   460    CONTINUE
0123   470    CONTINUE
0124   C---REDEFIN.LIGNES PUR SUBSTIT. ARRIERE
0125    480   DO500 M=1+IJK,NT
0126          DO490 J=0,1
0127          SBUF(II+2*M-J)=SBUF(II+2*M-J)/AUX
0128          IF(M.EQ.1)GOTO500
0129   490    CONTINUE
0130   500    CONTINUE
0131          IF(IJK.EQ.0)GOTO520
0132   501    CALL BWR(2,IWO2,SBUF,240)
0133          JJ=I/2
0134          J=((JJ-1)/NN)*NN
0135          IF(LL.NE.J)GOTO520
0136          DO510 K=1,120
0137   510    RBUF(K,JJ-LL)=SBUF(K)
0138   520    CONTINUE
0139          IWO(4)=IWO(2)-MXE+1
0140          IWO(5)=0
0141          IWO(6)=0
0142          DO 529 LKK=1,3
0143          CALL SWO(IWO,IWO,80*LL)
0144    529   CONTINUE
0145          CALL BWR(2,IWO,RBUF,240*MINO(NP-LL,NN))
0146          ASSIGN 535 TO ILB
0147          IL=((NP-1)/NN)*NN
0148          IF(IL.NE.LL)GOTO368
0149   535    DEPL(2*NP)=DEPL(2*NP)/RBUF(62,NP-LL)
0150          ASSIGN538 TO ILB
0151   C---SUBSTIT.ARRIERE
0152          DO560  J=NP,1,-1
0153          IL=((J-1)/NN)*NN
0154          IF(IL.NE.LL)GOTO368
0155   538    DO550 K=0,1
0156          IJK=60*(1-K)
0157          IM=2*J-K
0158          DO545 M=2,NT
```

```
0159          JJ=ISP(M,J-LL)
0160          IF(JJ)540,546,540
0161   540    IN=IJK+2*M
0162          DO542 L=0,1
0163          DEPL(IM)=DEPL(IM)-RBUF(IN-L,J-LL)*DEPL(2*JJ-L)
0164   542    CONTINUE
0165   545    CONTINUE
0166    546   IF(K.EQ.1)DEPL(2*J-1)=DEPL(2*J-1)-RBUF(2,J-LL)*DEPL(2*J)
0167   550    CONTINUE
0168   560    CONTINUE
0169          WRITE(LU1,2010)
0170   2010    FORMAT(10/)
0171          INAM(2)=2HF8
0172          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0173          GOTO9999
0174    3300  WRITE(LU1,2)J
0175    2     FORMAT(5/,X"TERME DIAGONAL NUL DANS LA COLONNE"I5,5/)
0176   3       IWO(5)=0
0177          IWO(6)=0
0178          DO 4 I=1,6
0179    4     IWO1(I)=IWO(I)
0180          IWO1(4)=IWO(1)+MXE
0181          IWO(4)=IWO(1)
0182          DO8 I=1,NP
0183          IF(I.NE.0)GOTO9
0184          CALL BWR(1,IWO,TBUF,240)
0185          WRITE(LU1,6)I,(TBUF(J),J=1,120)
0186    6     FORMAT(/X"NOEUD"I4/,2(10(6E12.4,/),2/))
0187          CALL BWR(1,IWO1,JBUF,30)
0188          WRITE(LU1,7)(JBUF(J),J=1,30)
0189    7      FORMAT(2/,2(15I6/))
0190          GOTO8
0191    9      CALL SWO(IWO,IWO,240)
0192          CALL SWO(IWO1,IWO1,30)
0193    8     CONTINUE
0194   C*****
0195          STOP1602
0196   C*****
0197   9999   END
0198          END$
```

```
SELF8  T=00003 IS ON CR00040 USING 00019 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002    C----DATE: 21/ 4/78
0003          PROGRAM ELF8
0004    C*****************************************************************
0005    C*                                                               *
0006    C*     PROGRAMME POUR OBTENIR LES FORCES NODALES NON EQUILIBREES  *
0007    C*     DANS LES ELEMENTS EN ACIER ET DE LIAISON.STOCKAGE DANS     *
0008    C*     LE VECTEUR "CHARG".                                       *
0009    C*                                                               *
0010    C*****************************************************************
0011          DIMENSION JBUF(36),DBA(4),DBL(2,4),IP(5)
0012          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0013         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0015         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0016         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0017          EQUIVALENCE (JBUF,DBA),(JBUF,DBL)
0018         C,(LU1,IGO(4))
0019    C-----
0020    C-----
0021          CALL RMPAR(IP)
0022    C-----
0023    C-----INITIALISATION DES CONTROLES
0024          IWO(4)=IWO(1)+MXE+MXP+MXR
0025          IWO(5)=0
0026          IWO(6)=0
0027    C----
0028          XTOLER=0.01
0029    C----
0030    C-----MISE A ZERO DU VECTEUR DES CHARGES RESIDUELLES
0031          DO 10 I=1,2*NP
0032     10   CHARG(I)=0.
0033    C-----"DO" POUR TOUS LES ELEMENTS
0034          DO 800 I=1,NE
0035          IF(IMAT(I))20,30,30
0036    C-----ELEMENTS EN BETON
0037     20   CALL SWO(IWO,IWO,36)
0038          GOTO 800
0039    30    I1=NPE(2,I)
0040          I0=NPE(1,I)
0041          UI=DEPL(2*I0-1)
0042          VI=DEPL(2*I0)
0043          UJ=DEPL(2*I1-1)
0044          VJ=DEPL(2*I1)
0045          CALL BWR(1,IWO,JBUF,36)
0046          IF(IMAT(I).NE.0)GOTO100
0047    C-----ELEMENTS EN ACIER
0048          AUX0=JCOOR(2,I1)-JCOOR(2,I0)
0049          AUX=JCOOR(1,I1)-JCOOR(1,I0)
0050          ALFA=ATAN(AUX0/AUX)
0051          IF(AUX.LT.0.) ALFA=ALFA+3.141592
0052          IF(JCOOR(1,I1).EQ.JCOOR(1,I0))ALFA=SIGN(3.141592/2.,AUX0)
0053          RL=SQRT(AUX**2+AUX0**2)
0054          C=COS(ALFA)
0055          S=SIN(ALFA)
0056          UPI=C*UI+S*VI
0057          UPJ=C*UJ+S*VJ
0058          AUX0=(UPJ-UPI)/RL
0059          AUX=DBA(1)*UI+DBA(2)*VI+DBA(3)*UJ+DBA(4)*VJ+TENS(1,I)
0060          AUX1=AUX
0061          DEF(1,I)=DEF(1,I)+AUX0
0062          TENS(1,I)=DEF(1,I)*EA
0063          IF(ABS(TENS(1,I)).GT.FA)TENS(1,I)=SIGN(FA,TENS(1,I))
0064          AUX5=AUX-TENS(1,I)
0065          AUX=AUX5*NPE(3,I)*0.01
0066          AUX4=AMAX1(XTOLER*ABS(TENS(1,I)),0.5)
0067          IF(ABS(AUX5).LE.AUX4)GOTO41
0068          TOLER=1
0069    C&&&&
0070          WRITE(LU1,38)I,TENS(1,I),AUX5
0071    38    FORMAT(/X"ACIER:"/X"I:"I5,3X"TEF:"E12.5,3X"TRES:"E12.5)
0072    39    WRITE(LU1,40)AUX0,AUX1,DEF(1,I)
0073    40    FORMAT(X"ADEF:"E12.5,3X"TCAL:"E12.5,3X"DEF:"E12.5)
0074    41    CONTINUE
0075    C&&&&
0076          AUX0=0.
0077          IF(ABS(DEF(1,I)).GT.DA)DEF(1,I)=10000.
0078     50   CHARG(2*I0-1)=CHARG(2*I0-1)-AUX*C+AUX0*S
```

```
0079          CHARG(2*I0)=CHARG(2*I0)-AUX*S-AUX0*C
0080          CHARG(2*I1-1)=CHARG(2*I1-1)+AUX*C-AUX0*S
0081          CHARG(2*I1)=CHARG(2*I1)+AUX*S+AUX0*C
0082          GOTO 800
0083    C-----ELEMENTS DE LIAISON(ACIER-BETON ET PAROIS-HOURDIS)
0084     100  ALFA=IMAT(I)/180.*3.141592
0085          IF(IMAT(I).GE.200)ALFA=0.
0086          C=COS(ALFA)
0087          S=SIN(ALFA)
0088          AUX4=DEF(1,I)
0089          AUX5=DEF(2,I)
0090          DEF(1,I)=DEF(1,I)-C*UI-S*VI+C*UJ+S*VJ
0091          DEF(2,I)=DEF(2,I)+S*UI-C*VI-S*UJ+C*VJ
0092          AUX4=DEF(1,I)-AUX4
0093          AUX5=DEF(2,I)-AUX5
0094          AUX=TENS(1,I)+DBL(1,1)*UI+DBL(1,2)*VI+DBL(1,3)*UJ+DBL(1,4)*VJ
0095          AUX0=TENS(2,I)+DBL(2,1)*UI+DBL(2,2)*VI+DBL(2,3)*UJ+DBL(2,4)*VJ
0096          IF(IMAT(I).EQ.400)GOTO300
0097          AUX1=0.
0098          AUX2=9756.
0099          TENS(2,I)=DEF(2,I)*10.*13463.*SQRT(FB)*NPE(3,I)
0100          AUX3=ABS(DEF(1,I))
0101          IF(AUX3.LT.0.00041)GOTO150
0102          AUX1=2.356
0103          AUX2=4010.
0104          IF(AUX3.LT.0.001)GOTO150
0105          AUX1=3.634
0106          AUX2=2732.
0107          IF(AUX3.LT.0.002)GOTO150
0108          AUX1=7.5
0109          AUX2=799.
0110          IF(AUX3.LT.0.00313)GOTO150
0111          AUX1=10.
0112          AUX2=0.
0113          IF(AUX3.LT.0.00422)GOTO150
0114          AUX1=14.250
0115          AUX2=-1007.
0116          IF(AUX3.LT.0.007)GOTO150
0117          AUX1=0.
0118          AUX2=0.
0119     150  TENS(1,I)=(AUX1+AUX2*DEF(1,I))*SQRT(FB)*NPE(3,I)
0120          AUX1=AUX
0121          AUX2=AUX0
0122          AUX=AUX-TENS(1,I)
0123          AUX0=AUX0-TENS(2,I)
0124          AUX3=AMAX1(1.,XTOLER*ABS(TENS(1,I)))
0125          IF(ABS(AUX).LE.AUX3)GOTO191
0126          TOLER=1.
0127    C&184
0128          WRITE(LU1,189)I,TENS(1,I),TENS(2,I),AUX,AUX0
0129     189  FORMAT(/X"LIAISON:"/" I:"I5,3X"TEF:"2(E12.5,3X)"TRES:"
0130         2(E12.5,3X))
0131     190  WRITE(LU1,190)AUX4,AUX5,AUX1,AUX2,DEF(1,I),DEF(2,I)
0132     191  FORMAT(X"ADEF:"2(E12.5,3X)"TCAL:"2(E12.5,3X),/
0133         1" DEF:"2(E12.5,3X))
0134     191  CONTINUE
0135    C&&&&
0136    C****
0137          IF(ABS(AUX0).GT.1.E-06)STOP1745
0138    C****
0139          GOTO 90
0140     300  TENS(1,I)=AUX
0141          TENS(2,I)=AUX0
0142     800  CONTINUE
0143    C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0144          INAM(2)=2HF9
0145          IP(4)=0
0146          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0147          END
0148          END$
```

```
SELF9  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

0001            FTN4
0002   C----DATE:15/ 1/79
0003          PROGRAM ELF9
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DES FORCES RESIDUELLES DANS LES *
0007   C*     ELEMENTS EN BETON.CONTROLE DE LA FISSURATION.             *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION B(3,6),DB(3,6),BT(6,3),AE(3,1),AD(6,1),
0011         CAT(3,1),T(3,3),CR(3,1),D(2),TC(3,1),
0012         CJBUF(36),IP(5)
0013         CAT(3,3)
0014          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0015         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0016         CNE,IPFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0017         CNE(2,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0018         CNE(2,600),CHARG(600),DEPL(600),ILM(2,100)
0019         EQUIVALENCE(JBUF,DB),(I,IP(5)),(LU1,IGO(4))
0020   C-----
0021   C-----
0022          CALL RMPPR(IP)
0023   C----
0024          XTOLER=0.05
0025   C----
0026   C-----DIRECTIONNEMENT
0027          GOTO(4,2,2000),IP(4)+1
0028   2      DO3 J=1,3
0029   3      AT(J,1)=TENS(J,I)
0030          CALL MATB(NPE(1,I),NPE(2,I),NPE(3,I),JCOOR,B,AREA)
0031          IR=0
0032           GOTO35
0033   C-----
0034   C-----INITIALISATION DES CONTROLES
0035   4      IWO(4)=IWO(1)+MXE+MXP+MXR
0036          IWO(5)=0
0037          IWO(6)=0
0038   C-----"DO" POUR TOUS LES ELEMENTS
0039          I=0
0040   5      I=I+1
0041          IP(4)=0
0042          IF(IMAT(I))20,10,10
0043   C-----ELEMENTS EN ACIER ET DE LIAISON
0044    10    CALL SWO(IWO,IWO,36)
0045          GOTO 2000
0046   C-----ELEMENTS EN BETON
0047   C-----
0048   20     IF(IMAT(I).EQ.-1)GOTO110
0049   C----
0050   C---- ELEMENTS FISSURES
0051   C----
0052   C-----OBTENTION DE LA MATRICE (B) ET DE L'AUGMENTATION DES
0053   C-----DEFORMATIONS ET DES CONTRAINTES
0054          CALL MATB(NPE(1,I),NPE(2,I),NPE(3,I),JCOOR,B,AREA)
0055          IR=0
0056          DO30 J=1,3
0057          DO30 K=-1,0
0058    30    AD(2*J+K,1)=DEPL(2*NPE(J,I)+K)
0059          CALL PMR(1,IWO,JBUF,36)
0060          CALL PMM(B,AD,3,6,1,AE)
0061          CALL PMM(DB,AD,3,6,1,AT)
0062   C&&&&
0063          GOTO33
0064   35     WRITE(LU1,34)I
0065   34     FORMAT(/X"BETON FISSURE:"5X"I:"I5)
0066   31     WRITE(LU1,32)AE,AT,(TENS(J,I),J=1,3),(DEF(K,I),K=1,3)
0067   32     FORMAT(X"ADEF:"3E15.5,/X"ATENS:"3E15.5,/X"TENS.INIT.:"
0068         C3E15.5,/X"DEF INIT.:"3E15.5)
0069   33     CONTINUE
0070          IF(IP(4).EQ.1)GOTO70
0071   C-----
0072   C-----OBTENTION DEFORMATIONS ET CONTRAINTES(CALCULEES)
0073          DO 40 J=1,3
0074          AT(J,1)=AT(J,1)+TENS(J,I)
0075    40    DEF(J,I)=DEF(J,I)+AE(J,1)
0076   C-----OBTENTION DES CONTRAINTES CORRESPONDANTES AUX DEFORMATIONS
0077   C-----DETER. FISSURE ALFA=DIRECTION FISSURATION-1
0078          IF(IMAT(I).GT.-3000)GOTO70
```

```
0079          ALFA=(-IMAT(I)-3000)/10.
0080          IF(IMAT(I).LT.-3900)ALFA=ALFA-180.
0081          GOTO80
0082   70     ALFA=(-IMAT(I)-1000)/10.
0083          IF(IMAT(I).LT.-1900)ALFA=ALFA-180.
0084    80    ALFA=ALFA*3.141592/180.
0085          SC=SIN(ALFA)
0086          AUX=COS(ALFA)
0087          C2=AUX*AUX
0088          S2=SC*SC
0089          SC=SC*AUX
0090          D(2)=S2*DEF(1,I)+C2*DEF(2,I)-SC*DEF(3,I)
0091          D(1)=-2.*SC*(DEF(1,I)-DEF(2,I))+DEF(3,I)*(C2-S2)
0092          AUX=C2*DEF(1,I)+S2*DEF(2,I)+SC*DEF(3,I)
0093   C****
0094   C---- UNE FISSURE S'EST FERMEE
0095          IF(AUX.LT.0.)WRITE(LU1,84)I,AUX,1
0096          IF((IMAT(I).LE.-3000).AND.(D(2).LT.0.))WRITE(LU1,84)I,D(2),2
0097     84   FORMAT(//" ATTENTION...FISSURE FERMEE!!!...ELEMENT"I5,
0098         C,3X"AUX="E12.4,X"FISSURE"I2)
0099   C****
0100    85    CR(2,1)=0.
0101          CR(1,1)=0.
0102          CR(3,1)=0.
0103          CP(1)=AT(1,1)*C2+AT(2,1)*S2+AT(3,1)*2*SC
0104          CP(2)=AT(1,1)*S2+AT(2,1)*C2-AT(3,1)*2*SC
0105          CP(3)=-AT(1,1)*SC+AT(2,1)*SC+AT(3,1)*(C2-S2)
0106           IF(IMAT(I).LE.-3000)GOTO100
0107          IF(AUX.LT.0.004)CR(3,1)=0.15*EB*(1.-AUX/0.004)*D(1)
0108          IF(AUX.LT.FA/EA)CR(1,1)=FIS(I)*(AUX-FA/EA)**2
0109          IF(CR(1,1).GT.0.64*FB**(2./3.))CR(1,1)=EB*AUX
0110          IF(D(2).LT.0.)GOTO 90
0111          CR(2,1)=D(2)*EB
0112          IF(CR(2,1).LT.0.64*FB**(2./3.))GOTO500
0113   C---- UNE DEUXIEME FISSURE S'EST OUVERTE
0114          IMAT(I)=IMAT(I)-2000
0115          GOTO85
0116   90     AUX=-D(2)/0.00218
0117          IF(AUX.GT.1.)IR=1
0118          AUX0=FB/0.00218
0119   C****
0120           IF(EB/AUX0-2..LT.0.)STOP2503
0121   C****
0122          CR(2,1)=D(2)*EB/(1.+(EB/AUX0-2.)*AUX+AUX**2)
0123          GOTO 500
0124    100   BUX=FIS(I)
0125          DO401 III=1,2
0126          IF(AUX.LT.FA/EA)CR(III,1)=BUX*(AUX-FA/EA)**2
0127          IF(CR(III,1).GT.0.64*FB**(2./3.))CR(III,1)=EB*AUX
0128          AUX=D(2)
0129          BUX=0.64*FB**(2./3.)
0130          BUX=BUX/(FA/EA-BUX/EB)**2
0131    401    CONTINUE
0132          GOTO500
0133   C----
0134   C---- ELEMENTS NON FISSURES
0135   C----
0136    110    INAM(2)=2H90
0137          GOTO400
0138   C-----CONTENTION CONTRAINTES RESIDUELLES
0139    500   T(1,1)=C2
0140          T(1,2)=S2
0141          T(1,3)=-2*SC
0142          T(2,1)=S2
0143          T(2,2)=C2
0144          T(2,3)=2*SC
0145          T(3,1)=SC
0146          T(3,2)=-SC
0147          T(3,3)=C2-S2
0148          CALL PMM(T,CR,3,3,1,TC)
0149          L=0
0150          DO520 J=1,3
0151          AUX=AMAX1(0.5,XTOLER*ABS(CR(J,1)))
0152          IF(ABS(CP(J)-CR(J,1)).LE.AUX)GOTO520
0153          TOLER=1
0154          L=1
0155   520    CONTINUE
0156          DO521 J=1,3
0157          TENS(J,I)=TC(J,1)
0158    521   CR(J,1)=AT(J,1)-TC(J,1)
```

```
0159          CALL MTR(B,3,6,BT)
0160          CALL PMM(BT,CR,6,3,1,AD)
0161          AUX=AREA*ESP
0162          DO529 J=1,6
0163   529    AD(J,1)=AD(J,1)*AUX
0164   C&&&&
0165   C&&&&
0166          IF(L.EQ.0)GOTO550
0167          WRITE(LU1,34)I
0168          WRITE(LU1,533)TC,CR,FIS(I)
0169   533    FORMAT(X"TEF:"3E13.5,3X"TRES:"3E13.5,X"FIS:"E10.4)
0170   550    CONTINUE
0171   C&&&&
0172          DO530 J=1,3
0173          L=NPE(J,I)
0174          DO530 K=-1,0
0175   530    CHARG(2*L+K)=CHARG(2*L+K)+AD(2*J+K,1)
0176          IF(IR.EQ.1)DEF(1,I)=10000.
0177   2000   IF(I.LT.NE)GOTO5
0178   C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0179          INAM(2)=2H10
0180   400    CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4),IP(5))
0181          END
0182   C----
0183   C-----
0184   C-----SUBROUTINE "MATB" POUR LA FORMATION DE LA MATRICE "B"
0185          SUBROUTINE MATB(I,J,K,JCOOR,B,AREA)
0186          DIMENSION JCOOR(2,1),B(3,6)
0187          XI=JCOOR(1,I)
0188          YI=JCOOR(2,I)
0189          XJ=JCOOR(1,J)
0190          YJ=JCOOR(2,J)
0191          XK=JCOOR(1,K)
0192          YK=JCOOR(2,K)
0193          AREA=0.5*(XJ*YK+XI*YJ+XK*YI-(XJ*YI+XK*YJ+XI*YK))
0194   C****
0195          IF(AREA.LE.0.)STOP27
0196   C****
0197          AUX=2.*AREA
0198          BI=(YJ-YK)/AUX
0199          BJ=(YK-YI)/AUX
0200          BK=(YI-YJ)/AUX
0201          CI=(XK-XJ)/AUX
0202          CJ=(XI-XK)/AUX
0203          CK=(XJ-XI)/AUX
0204          B(1,1)=BI
0205          B(1,2)=0.
0206          B(1,3)=BJ
0207          B(1,4)=0.
0208          B(1,5)=BK
0209          B(1,6)=0.
0210          B(2,1)=0.
0211          B(2,2)=CI
0212          B(2,3)=0.
0213          B(2,4)=CJ
0214          B(2,5)=0.
0215          B(2,6)=CK
0216          B(3,1)=CI
0217          B(3,2)=BI
0218          B(3,3)=CJ
0219          B(3,4)=BJ
0220          B(3,5)=CK
0221          B(3,6)=BK
0222          END
0223   C----
0224   C-----SUBROUTINE "PMM" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)=(C)
0225   C-----
0226          SUBROUTINE PMM(A,B,N1,N2,N3,C)
0227          DIMENSION A(N1,N2),B(N2,N3),C(N1,N3)
0228          DO 20 I=1,N1
0229          DO 20 K=1,N3
0230          Z=0.
0231          DO 10 L=1,N2
0232   10     Z=Z+A(I,L)*B(L,K)
0233   20     C(I,K)=Z
0234          END
0235   C-----
0236   C-----
0237   C-----SUBROUTINE "MTR" POUR OBTENIR (C)=(A)T
0238   C-----
```

```
0239          SUBROUTINE MTR(A,N1,N2,C)
0240          DIMENSION A(N1,N2),C(N2,N1)
0241          DO 10 I=1,N1
0242          DO 10 K=1,N2
0243     10   C(K,I)=A(I,K)
0244          END
0245          END$
```

```
SEL90  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

0001            FTN4
0002   C----DATE:15/ 1/79
0003          PROGRAM EL90
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DES FORCES RESIDUELLES DANS LES *
0007   C*     ELEMENTS EN BETON.CONTROLE DE LA FISSURATION.(BIS).       *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION B(3,6),DB(3,6),BT(6,3),AE(3,1),AD(6,1),
0011         CAT(3,1),T(3,3),CR(3,1),D(2),TC(3,1),ER(3),
0012         CJBUF(36),IP(5),BUF(6)
0013         C,CP(2)
0014          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0015         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0016         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0017         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0018         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0019          EQUIVALENCE(JBUF,DB),(I,IP(5))
0020         C,(LU1,IGO(4))
0021   C-----
0022   C-----
0023          CALL RMPAR(IP)
0024   C----
0025          XTOLER=0.05
0026          JPACO=0
0027   C-----
0028   C-----OBTENTION DE LA MATRICE (B) ET DE L'AUGMENTATION DES
0029   C-----DEFORMATIONS ET DES CONTRAINTES
0030          CALL MATB(NPE(1,I),NPE(2,I),NPE(3,I),JCOOR,B,AREA)
0031          IR=0
0032          DO30 J=1,3
0033          DO30 K=-1,0
0034    30    AD(2*J+K,1)=DEPL(2*NPE(J,I)+K)
0035          CALL BWR(1,IWO,JBUF,36)
0036          CALL PMM(B,AD,3,6,1,AE)
0037          CALL PMM(DB,AD,3,6,1,AT)
0038          DO31 J=1,3
0039          BUF(J)=AE(J,1)
0040          BUF(J+3)=AT(J,1)
0041   31     CONTINUE
0042   C&&&&
0043   34     FORMAT(/X"BETON:"5X"I:"I5)
0044   32     FORMAT(X"ADEF:"3E15.5,/X"ATENS:"3E15.5)
0045    33    CONTINUE
0046   C&&&&
0047   C-----OBTENTION DEFORMATIONS ET CONTRAINTES(CALCULEES)
0048          DO 40 J=1,3
0049          AT(J,1)=AT(J,1)+TENS(J,I)
0050    40    DEF(J,I)=DEF(J,I)+AE(J,1)
0051   C-----OBTENTION DES CONTRAINTES CORRESPONDANTES AUX DEFORMATIONS
0052   C-----BETON NON FISSURE. "ALFA"=ORIENTATION DIRECTIONS PRINCIPALES
0053          IF(DEF(1,I).EQ.DEF(2,I))GOTO45
0054          ALFA=0.5*ATAN(DEF(3,I)/(DEF(1,I)-DEF(2,I)))
0055          GOTO50
0056   45     ALFA=0.5*SIGN(3.141592/2.,DEF(3,I))
0057          IF(DEF(3,I).EQ.0.)ALFA=0.
0058   50     SC=SIN(ALFA)
0059          AUX=COS(ALFA)
0060          C2=AUX*AUX
0061          S2=SC*SC
0062          SC=SC*AUX
0063   C-----OBTENTION DES DEFORMATIONS PRINCIPALES
0064          D(1)=C2*DEF(1,I)+S2*DEF(2,I)+SC*DEF(3,I)
0065          D(2)=S2*DEF(1,I)+C2*DEF(2,I)-SC*DEF(3,I)
0066          CR(3,1)=0.
0067          K=0
0068   C---- D(1)<=D(2) ..(VALEUR ARIMETIQUE)
0069          IF(D(1).LE.D(2))GOTO 111
0070          K=1
0071          J=-1
0072          IF(ALFA.LE.0.)J=1
0073          ALFA=ALFA+3.141592*J/2.
0074          AUX=S2
0075          S2=C2
0076          C2=AUX
0077          SC=-SC
0078          AUX=D(1)
```

```
0079          D(1)=D(2)
0080          D(2)=AUX
0081   111     AUX=-AT(1,1)*SC+AT(2,1)*SC+AT(3,1)*(C2-S2)
0082          IF(AT(1,1).EQ.AT(2,1))GOTO105
0083          ALFA0=0.5*ATAN(2.*AT(3,1)/(AT(1,1)-AT(2,1)))
0084          GOTO106
0085   105    ALFA0=0.5*SIGN(3.141592/2.,AT(3,1))
0086          IF(AT(3,1).EQ.0.)ALFA0=0.
0087   106    AX1=ALFA0*180./3.141592
0088          IF(K.EQ.1)AX1=AX1+90.*J
0089          AX2=ALFA*180./3.141592
0090          IF(ABS(AX1-AX2).GT.0.5)WRITE(LU1,109)I,AX1,AT,AUX,(DEF(J,I),
0091         CJ=1,3),AX2
0092   109    FORMAT(/X"TXY#0:"3X"EL:"I5.4X"ALF0:"F10.4,2X"CON (X,Y,XY):"
0093         C,3(E11.5,3X)"C.P.XY:"E11.5,/X"DEF(X,Y,XY):"3(E11.5,3X),3X
0094         C"ALFA:"F10.4)
0095          CP(1)=AT(1,1)*C2+AT(2,1)*S2+AT(3,1)*2*SC
0096          CP(2)=AT(1,1)*S2+AT(2,1)*C2-AT(3,1)*2*SC
0097   C*****
0098           IF(CP(1).GT.CP(2))STOP2507
0099   C*****
0100          CP(1)=SQRT((AT(1,1)-AT(2,1))**2+4*AT(3,1)**2)/2.
0101          CP(2)=(AT(1,1)+AT(2,1))/2.+CP(1)
0102          CP(1)=CP(2)-2.*CP(1)
0103          IPACO=0
0104   C-----OBTENTION CONTRAINTES REELLES CORRESPONDANTES AUX
0105   C-----DEFORMATIONS CALCULEES
0106          IF((CP(2)/CP(1).GE.-0.50).AND.((D(1).NE.0.).OR.(D(2).NE.0.))
0107         C.AND.(CP(1).LT.0.))GOTO125
0108          ASSIGN 113 TO ILB
0109          VV=VU
0110          GOTO114
0111   112     ASSIGN 320 TO ILB
0112          VV=0.9*VU
0113   114    AUX=EB/(1.-VV*VV)
0114          CR(1,1)=AUX*(D(1)+VV*D(2))
0115          CR(2,1)=AUX*(D(2)+VV*D(1))
0116   C****
0117          IF(CR(1,1).GT.CR(2,1))STOP2510
0118   C****
0119          GOTO ILB
0120   118     IF((D(1).EQ.0.).AND.(D(2).EQ.0.))GOTO320
0121   C****
0122          IF((CR(1,1).EQ.0.).AND.(CR(2,1).EQ.0.))STOP2511
0123   C****
0124          A=CR(2,1)/CR(1,1)
0125          IF((CR(1,1).GE.0.).AND.(CR(2,1).GE.0.))GOTO112
0126          IF(A.GE.-0.50)GOTO125
0127   C---- DOMAINE COMPRESSION-TRACTION LINEAIRE
0128   119     AUX=VU*(0.9-0.05/A)
0129          IF(ABS(AUX-VV).LT.0.001)GOTO320
0130          ASSIGN 120 TO ILB
0131          VV=AUX
0132          GOTO114
0133   120     A=CR(2,1)/CR(1,1)
0134   C****
0135          IF(A.GE.-0.49)STOP2512
0136   C****
0137          GOTO119
0138   C----DOMAINE NON LINEAIRE
0139   125    CR(1,1)=CP(1)
0140          CR(2,1)=CP(2)
0141          AUX=0.01
0142          A0=CR(2,1)/CR(1,1)
0143          A9=A0
0144   C&&&&
0145          IF(I.NE.JPACO)GOTO161
0146   126    WRITE(LU1,160)I,A0
0147   160    FORMAT(2/,X"ELEMENT:"I5,5X"A:"10X"FF:"10X"C1(1):"10X"C1(2):"10X
0148         C"A1="F10.3)
0149   161    CONTINUE
0150   C&&&&
0151          M=0
0152          M1=0
0153          M2=0
0154   C****
0155          IF(D(1).GE.0.)STOP2513
0156   C****
0157          IF(D(2).NE.0.)GOTO165
0158          I2=0
```

ECOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES BIBLIOTHÈQUE

```
0159          A=0.2
0160          A9=A
0161          GOTO170
0162    165   IZ=1
0163          AX1=1.
0164          AX2=0.201
0165          IF(D(2).LT.0.)GOTO166
0166          IZ=2
0167          AX1=0.199
0168          AX2=-0.5
0169    166   A0=AMIN1(A0,AX1-0.9*AUX)
0170          A0=AMAX1(A0,AX2+0.9*AUX)
0171          DO 300 J=0,200
0172          DO 290 K=-1,1,2
0173          A=A0+K*J*AUX
0174          IF(K.EQ.-1)GOTO168
0175          IF(N1.EQ.1)GOTO280
0176          IF(A.LT.AX1)GOTO170
0177          N1=1
0178          A=AX1
0179          GOTO170
0180    168    IF(N2.EQ.1)GOTO280
0181          IF(A.GT.AX2)GOTO170
0182          N2=1
0183          A=AX2
0184   C****
0185          IF(J.EQ.0)STOP2514
0186   C****
0187    170   CALL ROT(-2.5,-2.5*A,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
0188          EBJ=EB/(1.-VU*A)
0189          DO 200 N=1,2
0190          AUX0=D(N)/ER(N)
0191   C****
0192          IF(AUX0.GE.0.)GOTO175
0193          WRITE(LU1,171)I,N,A,D,ER
0194    171   FORMAT(2I6,6E12.5)
0195          STOP2515
0196   C****
0197    175   IF((N.EQ.1).OR.(A.LT.0.199).OR.(A.GT.0.201))GOTO172
0198          CR(2,1)=-10000.
0199          GOTO200
0200    172    IF(AUX0.LT.1 )GOTO198
0201   C****
0202          IF(M.EQ.2)STOP2517
0203   C****
0204          IF(IPACO.NE.1)GOTO173
0205          IF(N.EQ.1)GOTO305
0206          GOTO200
0207    173   IF(IZ.EQ.0)GOTO305
0208          IF(IZ.EQ.2)GOTO195
0209          IF((N.EQ.1).AND.(K.EQ.1))N1=1
0210          IF((N.EQ.1).OR.(K.EQ.1))GOTO280
0211          IF(A.GT.0.210)GOTO174
0212          A=A+AUX*0.1
0213          GOTO170
0214    174   N2=1
0215          GOTO280
0216    195    IF((N.EQ.1).AND.(K.EQ.-1))N2=1
0217           IF((N.EQ.2).AND.(K.EQ.-1).AND.(A.LE.0.))N2=1
0218           IF((N.EQ.1).OR.(K.EQ.-1).OR.(A.LE.0.))GOTO280
0219          IF(A.LT.0.190)GOTO196
0220          A=A-AUX*0.1
0221          GOTO170
0222    196   N1=1
0223          GOTO280
0224    198   CR(N,1)=EBJ*D(N)/(1.+(EBJ*ER(N)/SR1
0225         C-1.-GA)*AUX0+GA*AUX0**2)
0226          IF(IZ.EQ.0)GOTO311
0227          EBJ=EB/(A-VU)
0228    200   CONTINUE
0229          IF(IPACO.EQ.0)GOTO199
0230          CR(2,1)=CR(1,1)*A9
0231          GOTO500
0232    199   FFF=CR(1,1)-CR(2,1)
0233   C&&&&
0234          IF(I.NE.JPACO)GOTO207
0235   201    WRITE(LU1,206)A,FFF,CR(1,1),CR(2,1)
0236    206   FORMAT(11X,F10.5,3F16.3)
0237   207    CONTINUE
0238   C&&&&
```

```
0239          IF(M.NE.0)GOTO209
0240          CRA=CR(1,1)
0241          CRB=CR(2,1)
0242   209    IF(ABS(FFF).LE.0.01)GOTO310
0243          IF(M.NE.0)GOTO210
0244          M=1
0245          I0=1
0246          IF(FFF.LT.0.)I0=-1
0247          GOTO 280
0248    210   I1=1
0249          IF(FFF.LT.0.)I1=-1
0250          IF(I0.EQ.I1)GOTO270
0251          IF(CR(2,1).LT.-9999.)GOTO215
0252          IF(M.NE.2)GOTO220
0253          IF((A.LE.0.190).OR.(A.GE.0.210))GOTO310
0254    215   CR(2,1)=CR(1,1)
0255          GOTO310
0256    220   M=2
0257          A=A-K*AUX*0.9
0258          GOTO170
0259    270   IF(M.NE.2)GOTO280
0260          A=A+K*AUX*0.1
0261          GOTO170
0262    280   IF(J.EQ.0)GOTO 300
0263    290   CONTINUE
0264          IF(N1*N2.EQ.1)GOTO305
0265    300   CONTINUE
0266   C****
0267           STOP2516
0268   C*****
0269   C----ELEMENT EN RUPTURE
0270   305    IF(A9.LT.-1./15.)GOTO306
0271          IF((IPACO.EQ.1) OR.(A9.GE.0.2))GOTO304
0272           GOTO313
0273    304     IR=1
0274          GOTO524
0275   306     IF(A9.GT.-0.5)GOTO309
0276          WRITE(LU1,307)A9,ALFA,AT,(DEF(M,I),M=1,3)
0277          A9=-0.499999
0278   307    FORMAT(X"DISCONTINUITE:"5X"A9:"E10.4,3X"ALFA:"E10.4,
0279         C/X"AT:"3E15.4,5X"DEF:"3E15.4)
0280    309    CALL ROT(-2.5,-2.5*A9,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
0281          IF((IPACO.EQ.1).OR.(A9.LE.-0.4999))GOTO312
0282    313   IPACO=1
0283          GOTO125
0284    312    FIS(I)=SR1*A9/(FA/EA-ER(2))**2
0285          GOTO330
0286   310    CR(1,1)=0.5*(CR(1,1)+CR(2,1))
0287   311    CR(2,1)=A*CR(1,1)
0288          GOTO500
0289   C----RUPTURE DOMAINE LINEAIRE
0290    320   AUX=FB**(1./3.)
0291          IF(CR(1,1).LT.0.)AUX=(AUX*A-0.366157)/A
0292          AUX=FB*0.64/AUX
0293          IF(CR(2,1).LT.AUX)GOTO500
0294          AUX0=AUX*(1.-YY/A)/EB
0295          FIS(I)=AUX/(FA/EA-AUX0)**2
0296   C-----FISSURATION DES ELEMENTS
0297   330    TK=ALFA*180./3.141592
0298          J=-1
0299          IF(TK.LE.0.)J=1
0300          TK=TK+90.*J
0301          IF(TK.LT.0.)TK=TK+180.
0302          IMAT(I)=-1000-TK*10.
0303          DO340 J=1,3
0304   340    TENS(J,I)=AT(J,1)
0305          IP(4)=1
0306          GOTO 550
0307   C-----OBTENTION CONTRAINTES RESIDUELLES
0308    500   T(1,1)=C2
0309          T(1,2)=S2
0310          T(1,3)=-2*SC
0311          T(2,1)=S2
0312          T(2,2)=C2
0313          T(2,3)=2*SC
0314          T(3,1)=SC
0315          T(3,2)=-SC
0316          T(3,3)=C2-S2
0317          M=0
0318   501    A=CR(2,1)/CR(1,1)
```

```
0319          AUX8=CR(1,1)
0320          AUX9=CR(2,1)
0321          AUX7=A
0322          CALL PMM(T,CR,3,3,1,TC)
0323          L=0
0324          AUX6=AMIN1(AUX8,AUX9)
0325          DO520 J=1,2
0326          AUX=AMAX1(0.5,XTOLER*ABS(AUX6))
0327           IF(ABS(CP(J)-AUX6).LE.AUX)GOTO525
0328          IF((M.EQ.1).OR.(A.GE.0.2).OR.(A.LE.-0 5))GOTO509
0329          M=1
0330          CR(1,1)=CRA
0331          CR(2,1)=CRA*A0
0332          WRITE(LU1,502)I,CRA,CRB
0333   502    FORMAT(/X"EL:"I5,5X"CRA,CRB:"2F10.1)
0334          GOTO501
0335   509    L=1
0336          IF((A.LT.0.18).OR.(A.GT.0.22))TOLER=1
0337    525    AUX6=AMAX1(AUX8,AUX9)
0338   520    CONTINUE
0339          DO526 J=1,3
0340          TENS(J,I)=TC(J,1)
0341    526    CR(J,1)=AT(J,1)-TC(J,1)
0342          CALL MTR(B,3,6,BT)
0343          CALL PMM(BT,CR,6,3,1,AD)
0344          AUX=AREA*ESP
0345          DO519J=1,6
0346   519    AD(J,1)=AD(J,1)*AUX
0347   C&&&&
0348          IF((L.EQ.0).AND.(I.NE.JPACO))GOTO529
0349    524   BUX1=SQRT((AT(1,1)-AT(2,1))**2+4+AT(3,1)**2)/2.
0350          BUX2=(AT(1,1)+AT(2,1))/2.
0351          BUX2=BUX2+BUX1
0352          BUX1=BUX2-2*BUX1
0353          BUX3=BUX2/BUX1
0354    521    WRITE(LU1,34)I
0355          WRITE(LU1,32)BUF
0356          IF(IR.EQ.1)GOTO540
0357   C&&&   WRITE(LU1,522)AREA,AD
0358   522    FORMAT(/X"AREA:"E12 5,3X"FRES:"6E12.4)
0359          WRITE(LU1,523)TC,CR,AUX8,AUX9,AUX7,BUX1,BUX2,BUX3
0360    523   FORMAT(X"TEF:"3E15 5,5X"TRES:"3E15.5
0361         C/X"TPF:"2E15.5,2X"ALFA:"F9 3.4X,"TPTL:"2E15.5,2X,"ALFA:"F9.3)
0362   529    CONTINUE
0363   C&&&&
0364          DO530 J=1,3
0365          L=NPE(J,I)
0366          DO530 K=-1,0
0367   530    CHARG(2*L+K)=CHARG(2*L+K)+AD(2*J+K,1)
0368   540    IF(IR.EQ.1)DEF(1,I)=10000.
0369          IP(4)=2
0370   550    INAM(2)=2HF9
0371          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4),IP(5))
0372          END
0373   C----
0374   C-----
0375   C-----SUBROUTINE "MATB" POUR LA FORMATION DE LA MATRICE "B"
0376          SUBROUTINE MATB(I,J,K,JCOOR,B,AREA)
0377          DIMENSION JCOOR(2,1),B(3,6)
0378          XI=JCOOR(1,I)
0379          YI=JCOOR(2,I)
0380          XJ=JCOOR(1,J)
0381          YJ=JCOOR(2,J)
0382          XK=JCOOR(1,K)
0383          YK=JCOOR(2,K)
0384          AREA=0.5*(XJ*YK+XI*YJ+XK*YI-(XJ*YI+XK*YJ+XI*YK))
0385   C****
0386          IF(AREA.LE.0.)STOP27
0387   C****
0388          AUX=2.*AREA
0389          BI=(YJ-YK)/AUX
0390          BJ=(YK-YI)/AUX
0391          BK=(YI-YJ)/AUX
0392          CI=(XK-XJ)/AUX
0393          CJ=(XI-XK)/AUX
0394          CK=(XJ-XI)/AUX
0395          B(1,1)=BI
0396          B(1,2)=0.
0397          B(1,3)=BJ
0398          B(1,4)=0.
```

```
0399          B(1,5)=BK
0400          B(1,6)=0.
0401          B(2,1)=0.
0402          B(2,2)=CI
0403          B(2,3)=0.
0404          B(2,4)=CJ
0405          B(2,5)=0.
0406          B(2,6)=CK
0407          B(3,1)=CI
0408          B(3,2)=BI
0409          B(3,3)=CJ
0410          B(3,4)=BJ
0411          B(3,5)=CK
0412          B(3,6)=BK
0413          END
0414    C----
0415    C-----SUBROUTINE "PMM" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)=(C)
0416    C-----
0417          SUBROUTINE PMM(A,B,N1,N2,N3,C)
0418          DIMENSION A(N1,N2),B(N2,N3),C(N1,N3)
0419          DO 20 I=1,N1
0420          DO 20 K=1,N3
0421          Z=0.
0422          DO 10 L=1,N2
0423   10     Z=Z+A(I,L)*B(L,K)
0424   20     C(I,K)=Z
0425          END
0426    C-----
0427    C-----
0428    C-----SUBROUTINE "MTR" POUR OBTENIR (C)=(A)T
0429    C-----
0430          SUBROUTINE MTR(A,N1,N2,C)
0431          DIMENSION A(N1,N2),C(N2,N1)
0432          DO 10 I=1,N1
0433          DO 10 K=1,N2
0434   10     C(K,I)=A(I,K)
0435          END
0436    C-----
0437    C----
0438    C-----SUBROUTINE "ROT" POUR OBTENIR LES CONTRAINTES ET DEFORMATIONS
0439    C-----EN RUPTURE
0440    C----
0441          SUBROUTINE ROT(T1,T2,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
0442          DIMENSION ER(3),D(13),E(3,13)
0443          DATA D/1.,.82,.64,.525,.2,.13,0.,-.052,-.07,-.103,-.204,-.35,-.5
0444         C/,E/-2.6,-2.6,3.39,-2.88,-1.96,3.12,-3.,-1.33,2.5,
0445         C-3.08,-0.76,1.96,-3.15,0.,1.64,-3.,0.53,1.33,
0446         C-2.18,0.8,0.8,-1.43,0.6,0.28,-1.23,0.49,.22,
0447         C-0.85,0.29,0.14,-0.46,0.19,0.052,-0.315,0.17,0.04,
0448         C-0.18959,0.12065,0.017235/
0449          A=T2/T1
0450          YU=0.2
0451    C-----CONTROLE T1<=T2 ; T1<0; A>-0.5
0452    C****
0453          IF(T1.GT.T2)STOP31
0454    C****
0455          IF(A.LT.-0.50001)STOP33
0456    C****
0457          IF(T1.GE.0.)STOP34
0458    C****
0459    C----OBTENTION CONTRAINTE RUPTURE SR1
0460          AUX0=FB**(1./3.)
0461          IF(A.GT.-1./15.)GOTO10
0462          SR1=0.64*FB/(A*AUX0-0.366157)
0463          GOTO20
0464   10     AUX=3.65
0465          IF(A.LT.0.)AUX=(15.*AUX0-43.05468)/(AUX0+5.49236)
0466          SR1=-(1.+AUX*A)*FB/(1.+A)**2
0467    C----OBTENTION DEFORMATIONS EN RUPTURE
0468   20     GA=AMAX1(0.,AMIN1(1.,1.+10.*A))
0469          RM=FRM(A)
0470          DO30 I=1,13
0471          IF(A.GT.D(I))GOTO40
0472   30     CONTINUE
0473          I=13
0474   40     IF(I.EQ.1)STOP36
0475    C****
0476          RM0=FRM(D(I-1))
0477          RM1=FRM(D(I))
0478          DO60 J=1,3
```

```
0479          ER(J)=E(J,I-1)+(E(J,I)-E(J,I-1))/(RM1-RM0)*(RM-RM0)
0480          ER(J)=ER(J)*1.E-03
0481    60    CONTINUE
0482          AUX=EB/(1.-VU*A)
0483          DO90 J=1,3
0484          AUX0=AUX*ER(J)/SR1-1.-GA
0485          IF(AUX0.GE.0.)GOTO80
0486          AUX2=ER(J)
0487          AUX0=AUX0+1.+GA
0488          ER(J)=(1.+GA)*SR1/AUX
0489    80    IF((J.EQ.1).AND.(A.EQ.VU))J=2
0490          IF(J.EQ.1)AUX=EB/(A-VU)
0491          IF(J.EQ.2)AUX=-EB/(VU*(1.+A))
0492    90    CONTINUE
0493          END
0494    C----
0495    C---- FONCTION FRM
0496    C----
0497          FUNCTION FRM(A)
0498          FRM=-1.
0499          IF(A.LT.0.)FRM=3.
0500          PI=3.141592
0501          B=A
0502          IF(A.EQ.0.)B=1.E-20
0503          FRM=(ATAN(1./B)+FRM*PI/4.)/PI*6.4
0504          END
0505          END$
```

```
SEL10  T=00003 IS ON CR00040 USING 00007 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C-----DATE:15/ 1/79
0003          PROGRAM EL10
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LA VERIFICATION DE LA VALIDITE DE LA       *
0007   C*     SOLUTION OBTENUE A CHAQUE ITERATION.                      *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION IP(5)
0011          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0012         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0013         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0014         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0015         C[illegible](2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0016          EQUIVALENCE(LU1,IGO(4))
0017   C-----
0018          CALL PMPAR(IP)
0019          IR=0
0020   C-----COMPARAISON DES FORCES NODALES RESIDUELLES AVEC LA TOLERANCE
0021   C-----MAXIMALE ADMISE ET DES DEFORMATIONS DES ELEMENTS AVEC CELLES
0022   C-----EN RUPTURE
0023          DO 100 I=1,NE
0024          IF(DEF(1,I) LE.9999.)GOTO 100
0025          WRITE(LU1,30)I
0026    30    FORMAT(/X"L'ELEMENT"I5,3X"EST EN RUPTURE")
0027          IR=1
0028   100    CONTINUE
0029   C***
0030          IF(IR.EQ.1)STOP2201
0031   C***
0032          IF((NITER.EQ.10000).OR.(MOD(ITER-1,NITER).NE.0))GOTO170
0033          WRITE(LU1,110)JCO,ITER,0.05,0.01,0.05
0034   110    FORMAT(4/,X"CAS CHARG.:"I4,5X"ITER.:"I5,5X
0035         C"TOL.CONTR.(%)="F5.2,2X,"(ACIER(%)="F5.2")",2X"(BET.FISS."
0036         C"(%)="F6.3")",2/
0037         C" NOEUD"4X"F.RES.(KG.)"4X"F.RES.Y(KG.)")
0038   140    DO 160 I=1,NP
0039          WRITE(LU1,155)I,(CHARG(2*I+J),J=-1,0)
0040   155    FORMAT(I6,2(F11.4,7X))
0041   160    CONTINUE
0042   170    IF(TOLER.EQ.0.)GOTO200
0043          IF(ITER.GT.3)GOTO200
0044   C-----CONTRAINTES NON EQUILIBREES NON NEGLIGEABLES.NOUV.ITER.
0045          ITER=ITER+1
0046          INAM(2)=2HF6
0047          TOLER=0.
0048          GOTO1040
0049   200    INAM(2)=2H1A
0050   1040   CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0051   9999   END
0052          END$
```

```
SEL1A  T=00003 IS ON CR00040 USING 00015 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C-----DATE: 21/ 4/78
0003          PROGRAM EL1A
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LA SORTIE DES CONTRAINTES A LA FIN DE      *
0007   C*   CHAQUE CAS DE CHARGEMENT.EVALUATION DES CONTRAINTES AUX NOEUDS.  *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010           DIMENSION IBUF(1100),CONTR(3,100),SUM(2,100),NN(100),CPR(2),IP(5)
0011          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0012         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,WU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0013         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0014         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0015         CCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0016          EQUIVALENCE (LU1,IGO(4)),(IBUF,CONTR),
0017         C(SUM,IBUF(601)),(NN,IBUF(1001))
0018   C-----
0019          CALL RNPAR(IP)
0020   C-----
0021   C-----INITIALISATION DES CONTROLES
0022          IWO(4)=IWO(1)+MXE+MXP
0023          IWO(5)=0
0024          IWO(6)=0
0025   C----
0026   C-----SORTIE DES CONTRAINTES
0027   C----
0028    200   WRITE(LU1,210)2HEL,2HEM,2HEN,2HTS,2H  ,2H
0029    210   FORMAT(3/,X,6A2,23X"(KG/CM2)",2/,4X"I(T)"6X"SX"6X"SY"5X"TXY"5X
0030         C"S-I"5X"S-II"3X"ALFA(DEGRES) ALFA FIS."5X"DEF-X"7X,
0031         C"DEF-Y"6X"DEF-XY")
0032   C----
0033   C----MM0=MM*11
0034   C----
0035          MM=100
0036          MM0=1100
0037   C----
0038          DO230 J=1,MM
0039          DO220 K=1,2
0040          CONTR(K,J)=0.
0041    220   SUM(K,J)=0.
0042          CONTR(3,J)=0.
0043    230   NN(J)=0
0044          L=NP/MM
0045          IF(MOD(NP,MM).NE.0)L=L+1
0046          J0=IWO(4)
0047          DO 235 I=1,L
0048    235   CALL BWR(2,IWO,IBUF,MM0)
0049   C****
0050          IF(IWO(4).GE.J0+MXE)STOP3000
0051   C****
0052          IWO(4)=J0
0053          IWO(5)=0
0054          IWO(6)=0
0055          L=0
0056          DO290 J=1,NE
0057          K=2HBE
0058          IF(IMAT(J).EQ.0)K=2HAC
0059          IF(IMAT(J).GT.0)K=2HLI
0060          IF(IMAT(J).EQ.400)K=2HHP
0061          IF(IMAT(J).LT.-1)K=2HF1
0062          IF(IMAT(J).LE.-3000)K=2HF2
0063          CALL CPRIN(TENS(1,J),TENS(2,J),TENS(3,J),CPR(1),CPR(2),AUX,
0064         CIMAT(J))
0065          AUX=AUX*180./3.141592
0066          AUX0=1.E+20
0067          IF(IMAT(J).GE.-1)GOTO239
0068          AUX0=(-IMAT(J)-1000)/10.
0069          IF(IMAT(J) LE.-3000)AUX0=(-IMAT(J)-3000)/10.
0070          IF(AUX0.GT.90.)AUX0=AUX0-180.
0071    239   WRITE(LU1,240)J,K,(TENS(M,J),M=1,3),CPR,AUX,AUX0,(DEF(N,J)
0072         C,N=1,3)
0073    240   FORMAT(I4,"("A2")"6F8.1,8X,F8.1,3E12.4)
0074   C-----OBTENTION DES CONTRAINTES PONDEREES AUX POINTS NODAUX
0075   C-----DEC ELEMENTS EN BETON
0076          AUX=0
0077          AUX0=0
0078          IF(IMAT(J).GE.0)GOTO290
```

```
0079          DO 260 K=1,3
0080          AUX=AUX+JCOOR(1,NPE(K,J))
0081          AUXO=AUXO+JCOOR(2,NPE(K,J))
0082    260   CONTINUE
0083          DO 280 K=1,3
0084          N=NPE(K,J)
0085          AN=ABS(AUX-3.*JCOOR(1,N))
0086          BN=ABS(AUXO-3.*JCOOR(2,N))
0087          IF((N-1)/MM.EQ.L)GOTO 270
0088          CALL BWR(2,IWO,IBUF,MMO)
0089          L=(N-1)/MM
0090          IWO(4)=JO
0091          IWO(5)=0
0092          IWO(6)=0
0093          CALL SWO(IWO,IWO,L*MMO)
0094          CALL BWR(1,IWO,IBUF,MMO)
0095          IWO(4)=JO
0096          IWO(5)=0
0097          IWO(6)=0
0098          CALL SWO(IWO,IWO,L*MMO)
0099    270   N=N-L*MM
0100          SUM(1,M)=SUM(1,M)+AN/(AN+BN)
0101          SUM(2,M)=SUM(2,M)+BN/(AN+BN)
0102          CONTR(1,M)=CONTR(1,M)+AN*TENS(1,J)/(AN+BN)
0103          CONTR(2,M)=CONTR(2,M)+BN*TENS(2,J)/(AN+BN)
0104          CONTR(3,M)=CONTR(3,M)+TENS(3,J)
0105          NN(M)=NN(M)+1
0106    280   CONTINUE
0107    290   CONTINUE
0108          CALL BWR(2,IWO,IBUF,MMO)
0109          INAM(2)=2H1B
0110    1040  CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0111    9999  END
0112  C-----SUBROUTINE "CPRIN" POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES PRINCIPALES
0113          SUBROUTINE CPRIN(TX,TY,TXY,T1,T2,ALFA,IMAT)
0114          T1=0.
0115          T2=0.
0116          ALFA=0.
0117          IF(IMAT.GE.0)RETURN
0118          IF(TX.EQ.TY)GOTO5
0119          ALFA=0.5*ATAN(2.*TXY/(TX-TY))
0120          GOTO 10
0121  5       ALFA=0.5*3.141592/2.
0122          IF(TXY.EQ.0.)ALFA=0.
0123          IF(TXY.LT.0.)ALFA=-ALFA
0124    10    SC=COS(ALFA)
0125          T1=SIN(ALFA)
0126          C2=SC*SC
0127          S2=T1*T1
0128          SC=SC*T1
0129          T1=C2*TX+S2*TY+2*SC*TXY
0130          T2=S2*TX+C2*TY-2*SC*TXY
0131          END
0132          END$
```

```
SEL18  T=00003 IS ON CR00040 USING 00014 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C----DATE: 28/ 8/78
0003          PROGRAM EL1B
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*       PROGRAMME POUR LA SORTIE DES CONTRAINTES A LA FIN DE    *
0007   C*       CHAQUE CAS DE CHARGEMENT PASSAGE AU CAS DE CHARGEMENT   *
0008   C*       SUIVANT.                                                *
0009   C*                                                               *
0010   C*****************************************************************
0011          DIMENSION IBUF(1100),CONTR(3,100),SUM(2,100),NN(100),
0012         CCPR(2),IP(5),RBUF(2),JFIL(3),
0013         CLBUF(6002),SBUF(3,600),TBUF(3,400)
0014          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0015         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0016         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0017         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0018         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0019          EQUIVALENCE (IBUF,CONTR),(SUM,IBUF(601)),(NN,IBUF(1001)),
0020         C(LU1,IGO(4)),(IBUF(2),RBUF),(LBUF(3),SBUF),
0021         C(LBUF(3603),TBUF)
0022          DATA JFIL/2HRE,2HSU,2HLT/
0023   C-----NOMBRE SECTEURS JFIL:47*NC
0024   C-----
0025          CALL RMPAR(IP)
0026   C-----
0027          IWO(4)=IWO(1)+MXE+MXP
0028          IWO(5)=0
0029          IWO(6)=0
0030   C----
0031   C-----MMO=MM*11
0032   C-----
0033          MM=100
0034          MMO=1100
0035   C----
0036          L=-MM
0037          WRITE(LU1,210)2HPO,2HIN,2HT ,2HNO,2HDA,2HL:
0038   210     FORMAT(3/,X,6A2,23X,"(KG/CM2)",2/,4X"I(T)"6X,"SX"6X,"SY"5X"TXY"5X
0039         C"S-I"5X"S-II"3X"ALFA(DEGRES)")
0040   C----SORTIE DE  "JC";"TENS" ET "CONTR" SUR 'JFIL'
0041   C-----ECRITURE DE"CONTRAINTES" AUX POINTS NODAUX PAR L,UNITE
0042   C-----LOGIQUE"LU1"
0043          LBUF(1)=JCO
0044          DO100J=1,3
0045          DO100 K=1,NE
0046   100     SBUF(J,K)=TENS(J,K)
0047          DO 500 J=1,NP
0048          IF(MOD(J,MM).NE.1)GOTO 300
0049          CALL BWR(1,IWO,IBUF,MMO)
0050          L=L+MM
0051   300    M=J-L
0052          IF(NN(M).NE.0)GOTO310
0053          CONTR(1,M)=1.E+06
0054          GOTO400
0055   310    CONTR(1,M)=CONTR(1,M)/SUM(1,M)
0056          CONTR(2,M)=CONTR(2,M)/SUM(2,M)
0057          CONTR(3,M)=CONTR(3,M)/NN(M)
0058          CALL CPRIN(CONTR(1,M),CONTR(2,M),CONTR(3,M),CPR(1),CPR(2),
0059         CAUX,-1)
0060          AUX=AUX*180./3.141592
0061          WRITE(LU1,240)J,2HBE,(CONTR(K,M),K=1,3),CPR,AUX
0062   240    FORMAT(I4,"(",A2")",6F8.1)
0063   400    IF((J.NE.NP).AND.(MOD(J,MM).NE.0))GOTO 500
0064          KK=MOD(J-1,MM)+1
0065          DO450 K=1,3
0066          DO450 KO=1,KK
0067   450    TBUF(K,J-KK+KO)=CONTR(K,KO)
0068   500    CONTINUE
0069          J=47*(JC-1)
0070          CALL EXEC(15,1028,LBUF,6002,JFIL,J)
0071   C-----NOUVEAU CAS DE CHARGEMENT
0072          JC=JC+1
0073          JCO=JCO+1
0074          IF(JC.GT.NC)GOTO 1050
0075          ITER=1
0076          IWO(4)=IWO(2)-MXE
0077          IWO(5)=0
0078          IWO(6)=0
```

```
0079          CALL SWO(IWO,IWO,IOFF)
0080          DO 1000 I=1,NP+1
0081          CALL BWR(1,IWO,IBUF,5)
0082          IOFF=IOFF+5
0083          IF(IBUF(1).EQ.0)GOTO 1010
0084          J=IBUF(1)
0085          CHARG(2*J-1)=CHARG(2*J-1)+RBUF(1)
0086          CHARG(2*J)=CHARG(2*J)+RBUF(2)
0087   1000   CONTINUE
0088  C-----RETOUR AU PROGRAMME ELF3
0089   1010   INAM(2)=2HF3
0090   1040   CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0091          GOTO9999
0092  C-----C'ETAIT LE DERNIER CAS DE CHARGEMENT
0093  C****
0094   1050   IF(IGO(1).GE.0)STOP3777
0095  C****
0096          GOTO 1010
0097   9999   END
0098  C-----SUBROUTINE "CPRIN" POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES PRINCIPALES
0099          SUBROUTINE CPRIN(TX,TY,TXY,T1,T2,ALFA,IMAT)
0100          T1=0.
0101          T2=0.
0102          ALFA=0.
0103          IF(IMAT.GE.0)RETURN
0104          IF(TX.EQ.TY)GOTO5
0105          ALFA=0.5*ATAN(2.*TXY/(TX-TY))
0106          GOTO 10
0107  5       ALFA=0.5*3.141592/2.
0108          IF(TXY.EQ.0.)ALFA=0.
0109          IF(TXY.LT.0.)ALFA=-ALFA
0110   10     SC=COS(ALFA)
0111          T1=SIN(ALFA)
0112          C2=SC*SC
0113          S2=T1*T1
0114          SC=SC*T1
0115          T1=C2*TX+S2*TY+2*SC*TXY
0116          T2=S2*TX+C2*TY-2*SC*TXY
0117          END
0118          END$
```

```
SEL11  T=00003 IS ON CR00040 USING 00009 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C---- DATE : 28/ 8/78
0003          PROGRAM EL11
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LE TRACE DES COURBES DE CONTRAINTES:       *
0007   C*      LECTURE DES DONNEES.                                     *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION JBUF(61),LBUF(6002),SBUF(3,600),TBUF(3,400),
0011         CIP(5),JFIL(3),YYM(2)
0012          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0013         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0015         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0016         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0017          EQUIVALENCE(IGO(3),LU),(LBUF(3),SBUF),(LBUF(3603),TBUF),
0018         C(XNX,ESC),(LO,ITER),(XX,TOLER),(YY,NITER)
0019         C,(JBUF,ILM),(JBUF(51),ICOD),(JBUF(52),ESC),(JBUF(54),XL)
0020         C,(JBUF(56),YL),(JBUF(59),YYM)
0021          DATA JFIL/2HRE,2HSU,2HLT/
0022   C-----
0023          CALL RMPAR(IP)
0024   C-----
0025   C-----
0026   C-----LECTURE CONTRAINTES DU FICHIER 'RESUL'
0027   C----
0028          IF(IP(4).EQ.1)GOTO20
0029   C----
0030    5     PAUSE003
0031          READ(1,*)NNC
0032          J=47*(NNC-1)
0033          CALL EXEC(14,102B,LBUF,6002,JFIL,J)
0034          JCO=LBUF(1)
0035          DO6 J=1,3
0036          DO6 K=1,NE
0037    6     TENS(J,K)=SBUF(J,K)
0038          DO10 J=1,3
0039          DO10 I=1,NP
0040    10    DEF(J,I)=TBUF(J,I)
0041          LO=-1
0042   C-----LECTURE DONNEES
0043          YY=30.
0044          XX=0.
0045          PAUSE 4
0046   C---- ICOD=0 :TRACE DE FLECHES DE CONTRAINTES PRINCIPALES(NOEUDS)
0047   C---- ICOD=-1:IDEM.ELEMENTS
0048   C---- ICOD=4 :NOUVELLE LECTURE DE DONNEES
0049   C---- ICOD=5 :STOP
0050   C---- ICOD=AB:A=1(SX)  A=2(SY)  A=3(SXY)
0051   C----          B=1(Y=CTE.)  B=2(X=CTE.)
0052   C---- ESC SERA LE NOMBRE(<=50) DE POINTS NODAUX OU D'ELEMENTS
0053   C----      (EN CE CAS,LES NUMEROS DES ELEMENTS SERONT INTRODUITS
0054   C----////NEGATIFS)........(POUR ICOD#0,4,5)
0055   20     READ(1,*)ICOD,ESC,XL,YL,YYM(1),YYM(2)
0056          IF(ICOD.EQ.4)GOTO5
0057   C****
0058          IF(ICOD.EQ.5)STOP7777
0059   C****
0060          IF(ICOD.GT.0)GOTO 1000
0061   C-----TRACE VECTEURS DES CONTRAINTES PRINCIPALES DANS LE BETON
0062          INAM(2)=2H13
0063          GOTO1111
0064   C---- TRACE DE COURBES
0065    1000   INAM(2)=2H12
0066          I=ESC+0.1
0067          DO1001 J=1,I
0068    1001   READ(LU,*)JBUF(J)
0069    1111  CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0070          END
0071          END$
```

```
SEL12  T=00003 IS ON CR00040 USING 00014 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C---- DATE : 24/ 2/78
0003          PROGRAM EL12
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LE TRACE DES COURBES DE CONTRAINTES.       *
0007   C*                                                               *
0008   C*****************************************************************
0009          DIMENSION CONTR(3,400),IBUF(2400),JBUF(61),X(50),Y(50),
0010         CIP(5),IAUX(4),YYM(2)
0011          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0012         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0013         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0014         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0015         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0016          EQUIVALENCE (IBUF,CONTR),(CHARG,X),(DEPL,Y)
0017         C,(IBUF,DEF),(XNX,ESC),(LO,ITER),(XX,TOLER),(YY,NITER)
0018         C,(JBUF,ILM),(JBUF(51),ICOD),(JBUF(52),ESC),(JBUF(54),XL)
0019         C,(JBUF(56),YL),(JBUF(58),YYM)
0020          DATA IAUX/1000,100,10,1/
0021   C-----
0022          CALL RMPAR(IP)
0023   C-----
0024           MM=400
0025          CALL PLTLU(10)
0026   C-----
0027   C-----TRACE DES COURBES
0028   C-----
0029    1000 YY=YY-YL-8.
0030         IF(YY.GE.0.)GOTO1010
0031         YY=30.
0032         CALL PLOT(XX+8.,0.,-3)
0033         XX=0.
0034         GOTO1000
0035    1010 XX=AMAX1(XX,XL)
0036         NX=XNX+0.1
0037         DO1030 I=1,NX
0038         IF(JBUF(I).LT.0)GOTO1025
0039         X(I)=JCOOR(MOD(ICOD,10),JBUF(I))
0040         L=(JBUF(I)-1)/MM
0041         IF(L.EQ.LO)GOTO1020
0042         IWO(4)=IWO(1)
0043         IWO(5)=0
0044         IWO(6)=0
0045         LO=L
0046         CALL SWO(IWO,IWO,6*MM*L)
0047         CALL BWR(1,IWO,IBUF,6*MM)
0048    1020 Y(I)=CONTR((ICOD/10),JBUF(I)-MM*L)
0049         GOTO1030
0050    1025 Y(I)=TENS((ICOD/10),-JBUF(I))
0051         J=2
0052         X(I)=0.
0053         IF(IMAT(-JBUF(I)).LT.0)J=3
0054         AUX=J
0055         DO1026 K=1,J
0056    1026  X(I)=X(I)+JCOOR(MOD(ICOD,10),NPE(K,-JBUF(I)))/AUX
0057    1030 CONTINUE
0058         X1=1.E+30
0059         X2=-1.E+30
0060         Y1=YYM(1)
0061         Y2=YYM(2)
0062         DO 1050 I=1,NX
0063         X1=AMIN1(X1,X(I))
0064         X2=AMAX1(X1,X(I))
0065    1050 CONTINUE
0066         X1=AMIN1(X1,0.)
0067         Y1=AMIN1(Y1,0.)
0068         Y2=AMAX1(Y2,0.)
0069         X2=(X2-X1)/XL
0070         Y2=(Y2-Y1)/YL
0071         X0=ABS(X1)/X2+4.
0072         Y0=ABS(Y1)/Y2+4.+YY
0073         CALL PLOT(X0,Y0,-3)
0074         L=3
0075         DO 1100 I=1,NX
0076         CALL PLOT(X(I)/X2,Y(I)/Y2,L)
0077    1100 L=2
```

```
      N=MOD(ICOD,10)
      M=JCOOR(3-N,JBUF(1))
      J=2H(W+3-N
      K=2H=W+N
      KO=2HXY
      IF(ICOD.LT.30)KO=2HY
      IF(ICOD.LT.20)KO=2HX
      JBUF(8)=2H=
      IF(M.LT.0)JBUF(8)=2H=-
      II=IABS(M)
      L1=0
      JBUF(9)=0
      JBUF(10)=0
      DO1110 KK=1,4
      JO=II/IAUX(KK)
      IF((JO.NE.0).OR.(L1.NE.0))GOTO1105
      MMM=32
      GOTO1106
 1105  L1=1
      MMM=48+JO
 1106  IF(MOD(KK,2).EQ.1)MMM=MMM*256
      JBUF(8+(KK+1)/2)=JBUF(8+(KK+1)/2)+MMM
      II=II-JO*IAUX(KK)
 1110  CONTINUE
      JBUF(1)=2HCO
      JBUF(2)=2HNT
      JBUF(3)=2HR.
      JBUF(4)=2H P
      JBUF(5)=2HOU
      JBUF(6)=2HR
      JBUF(7)=J
      JBUF(11)=2HCM
      JBUF(12)=2H);
      JBUF(13)=2HAB
      JBUF(14)=2HS.
      JBUF(15)=K
      CALL AXES(0.,0.,JBUF,30,0.,1.,X1,X2)
      JBUF(1)=2HOR
      JBUF(2)=2HDO
      JBUF(3)=2HNN
      JBUF(4)=2HEE
      JBUF(5)=2HS=
      JBUF(6)=2H S
      JBUF(7)=KO
      JBUF(8)=2H(K
      JBUF(9)=2HG/
      JBUF(10)=2HCM
      JBUF(11)=2H2)
      CALL AXES(-0.2,0.,JBUF,22,90.,1.,Y1,X2)
      CALL PLOT(-XO,-YO,-3)
      INAM(2)=2H11
      IP(4)=1
      CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
      END
      END$
```

```
SEL13  T=00003 IS ON CR00040 USING 00019 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C-----DATE: 4/9/78
0003          PROGRAM EL13
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LE TRACE DES FLECHES DE CONTRAINTES        *
0007   C*     PRINCIPALES DANS LE BETON.                                *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION CONTR(3,400),JBUF(61),X(600),Y(600),
0011         CCPR(2),IP(5),IAUX(4),YYM(2)
0012          COMMON IGO(5),ITITRE(36),IWO(6),INAM(3),IFIL(3),
0013         CNE,NP,NR,FREL,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,MITER,MXE,MXP,MXR,JCO,
0015         CNPE(3,600),TENS(3,600),DEF(3,600),IMAT(600),FIS(600),
0016         CJCOOR(2,400),CHARG(800),DEPL(800),ILM(2,100)
0017          EQUIVALENCE (DEF,CONTR),(CHARG,X),(DEPL,Y)
0018         C,(XNX,ESC),(LO,ITER),(XX,TOLER),(YY,NITER)
0019         C,(JBUF,ILM),(JBUF(51),ICOD),(JBUF(52),ESC),(JBUF(54),XL)
0020         C,(JBUF(56),YL),(JBUF(58),YYM)
0021          DATA IAUX/1000,100,10,1/
0022   C-----
0023          CALL RMPAR(IP)
0024   C-----
0025          CALL PLTLU(10)
0026          IP(4)=1
0027   C-----
0028   C-----TRACE VECTEURS DES CONTRAINTES PRINCIPALES DANS LE BETON
0029          IF(ICOD.EQ.0)GOTO20
0030          DO15 I=1,NE
0031          X(I)=0.
0032          Y(I)=0.
0033          IF(IMAT(I).GE.0)GOTO15
0034          DO14 J=1,3
0035          K=NPE(J,I)
0036          X(I)=X(I)+JCOOR(1,K)/3.
0037          Y(I)=Y(I)+JCOOR(2,K)/3.
0038    14    CONTINUE
0039    15    CONTINUE
0040          NN=NE
0041          GOTO35
0042   20     DO30 I=1,NP
0043          X(I)=JCOOR(1,I)
0044    30    Y(I)=JCOOR(2,I)
0045          NN=NP
0046   35     X1=1.E+30
0047          Y1=1.E+30
0048          Y2=-1.E+30
0049          X2=-1.E+30
0050          DO40 I=1,NN
0051          X1=AMIN1(X1,X(I))
0052          Y1=AMIN1(Y1,Y(I))
0053          Y2=AMAX1(Y2,Y(I))
0054          X2=AMAX1(X2,X(I))
0055    40    CONTINUE
0056          X1=AMIN1(X1,0.)
0057          Y1=AMIN1(Y1,0.)
0058          X2=(X2-X1)/XL
0059          Y2=(Y2-Y1)/YL
0060   C****
0061          IF(ABS(X1)+ABS(Y1).GT.0.1)STOP7770
0062   C****
0063          Y1=(30.-YL)/2.
0064          CALL PLOT(0.,Y1,-3)
0065          DO 500 I=1,NN
0066          IF(ICOD.EQ.0)GOTO300
0067          IF(IMAT(I).GE.0)GOTO500
0068          CALL CPRIN(TENS(1,I),TENS(2,I),TENS(3,I),CPR(1),CPR(2),ALFA,-1)
0069          GOTO350
0070   300    IF(CONTR(1,I).GT.1.E+05)GOTO 490
0071   C---- ELEMENTS DE BETON
0072          CALL CPRIN(CONTR(1,I),CONTR(2,I),CONTR(3,I),CPR(1),CPR(2),
0073         CALFA,-1)
0074   350    X(I)=X(I)/X2
0075          Y(I)=Y(I)/Y2
0076          DO 480 K=1,2
0077          CALL FLECH(CPR(K),ALFA+3.141592/2.*(K-1),X(I),Y(I),ESC)
0078          GOTO480
```

```
0079    351   JBUF(1)=2H
0080          IF(CPR(K).LT.0.)JBUF(1)=2H -
0081          II=ABS(CPR(K))
0082          L1=0
0083          JBUF(2)=0
0084          JBUF(3)=0
0085          DO440 KK=1,4
0086          J0=II/IAUX(KK)
0087          IF((J0.NE.0).OR.(L1.NE.0))GOTO405
0088          MMM=32
0089          GOTO406
0090    405   L1=1
0091          MMM=48+J0
0092    406    IF(MOD(KK,2).EQ.1)MMM=MMM*256
0093          JBUF(1+(KK+1)/2)=JBUF(1+(KK+1)/2)+MMM
0094          II=II-J0*IAUX(KK)
0095    440   CONTINUE
0096          CALL SYMB(X(I),Y(I)-0.3*K,0.25,JBUF,0.,6)
0097    480   CONTINUE
0098    490   IF(MOD(I,MM).EQ.0)L=L+MM
0099    500   CONTINUE
0100          CALL PLOT(XL+8.,-Y1,-3)
0101           INAM(2)=2H11
0102          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0103          END
0104    C-----SUBROUTINE "CPRIN" POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES PRINCIPALES
0105          SUBROUTINE CPRIN(TX,TY,TXY,T1,T2,ALFA,IMAT)
0106          T1=0.
0107          T2=0.
0108          ALFA=0.
0109          IF(IMAT.GE.0)RETURN
0110          IF(TX.EQ.TY)GOTO5
0111          ALFA=0.5*ATAN(2.*TXY/(TX-TY))
0112          GOTO 10
0113    5     ALFA=0.5*3.141592/2.
0114          IF(TXY.EQ.0.)ALFA=0.
0115          IF(TXY.LT.0.)ALFA=-ALFA
0116    10    SC=COS(ALFA)
0117          T1=SIN(ALFA)
0118          C2=SC*SC
0119          S2=T1*T1
0120          SC=SC*T1
0121          T1=C2*TX+S2*TY+2*SC*TXY
0122          T2=S2*TX+C2*TY-2*SC*TXY
0123          END
0124    C-----SUBROUTINE "FLECH" POUR LE TRACE DES VECTEURS
0125          SUBROUTINE FLECH(TENS,ALF,X,Y,ESC)
0126          ALFA=ALF
0127          BUX=ABS(TENS*ESC)/2.
0128          DO200 II=1,2
0129          AUX=BUX
0130          CALL PLOT(X,Y,3)
0131          X0=X+AUX*COS(ALFA)
0132          Y0=Y+AUX*SIN(ALFA)
0133          AUX=AUX/5.
0134          J=1
0135          IF(TENS.LT.0.)J=-1
0136          DO 100 I=-1,1,2
0137          X1=X0-AUX*COS(ALFA+I*3.141592/6.)*J
0138          Y1=Y0-AUX*SIN(ALFA+I*3.141592/6.)*J
0139          CALL PLOT(X0,Y0,2)
0140          CALL PLOT(X1,Y1,2)
0141    100   CONTINUE
0142          ALFA=ALFA+3.141592
0143    200    CONTINUE
0144          END
0145          END$
```

ANNEXE D - SERIE DE PROGRAMMES 'FLF'

Elle comporte les sous-programmes : FLFØ, FLF1, FLF2, FLF3, FLF4, FLF5, FLF6, FLF7, FL70, FLF8, FLF9, FL90, FL10 et FL11.

Les subroutines 'BWR' et 'SWO' sont identiques à celles utilisées dans le programme 'CPC'.

1.- Description des variables du 'common'

- Les variables IGO (5), IWO (6), INAM (3), IFIL (3), NE, NP, NR, NC, EB, EA, WU, FB, DA, TØ, ESP, JC, IOFF, ITER, TOLER, NITER, JCØ, JCOOR, NPE, sont similaires à celles du programme 'ELF'.

- IWO1 (6), IWO2 (6), IWO3 (6), IWO4 (6) sont semblables à IWO (6).

NB.- Nombre d'éléments du bossage. Ils doivent être placés derrière ceux du hourdis.

NCAP.- Nombre de couches du hourdis (les deux premières correspondent aux aciers inférieur et supérieur, respectivement).

NCAPB.- Nombre maximal de couches des éléments du bossage.

MCAP (60).- Nombre de couches de chaque élément du bossage.

ZCOOR (20).- Cote du c.d.g. de chaque couche, en cm (cf. fig. 3.20).

EPZ (20).- Epaisseur de chaque couche (cm).

DEF (6,NE).- Déformations des éléments au niveau du plan de référence (cf. 3.10) :

$$\varepsilon_{x_0}, \varepsilon_{y_0}, \gamma_{xy_0}, -w''_{xx}, -w''_{yy}, 2w''_{xy}$$

CHARG (5 NP).- Vecteur des charges appliquées aux points nodaux :

F_x, F_y, F_z, Tx, T_y (en kg et cm.) (cf. 3.12)

ILM (2,60).- Points nodaux avec les déplacements restreints:

ILM(1) : numéro du point nodal, ILM (2) : code=abcde

a,b,c,d,e valent 0 et 1 selon que u, v, w, θ_x, θ_y respectivement, soient libres ou empêchés.

Dans les appuis élastiques qui approchent l'encastrement élastique du hourdis dans les parois latérales du caisson, ILM (2) = - α ; α étant la constante du ressort (cf. 3.10):

FPRT (10), - coefficient de chargement de chaquecétape;
AXBUF (60), NPT, NPK, NPISP, NPAUX, NPKP, NPB, NPCC et NPDJ sont des variables auxiliaires.

- Les armatures sont définies de la manière suivante :

On établit une épaisseur équivalente des couches d'acier (supérieure et inférieure). Celles-ci supposées travailler dans le sens longitudinal ($\overrightarrow{ox}$).

Dans lesens transversal ($\overrightarrow{oy}$), le ferraillage est fixé moyennant deux coefficients :

acier transversal inférieur = acier longitudinal inférieur * ρ_i
" " supérieur = " " supérieur * ρ_s

Le programme permet également de renforcer le ferraillage de n'importe quel élément, par l'intermédiaire des quatre coefficients :

$\rho_i^\ell(j)$, $\rho_s^\ell(j)$, $\rho_i^t(j)$, $\rho_s^t(j)$, qui peuvent être établis pour tous les éléments 'j', où l'on veut modifier la quantité d'armatures.

2.- Listings

```
SFLF0  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C----DATE:15/ 1/79
0003          PROGRAM FLF0
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME INITIAL.LECTURE DES DONNEES ET INITIALISATION   *
0007   C*     DU PROCESSUS DE CALCUL.                                   *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION IBUF(11),IP(5),IHEUR(5),RBUF(5),LBUF(200),TBUF(5,200)
0011         C,CF(2)
0012          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0013         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0015         CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0016         CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0017         CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKF,NPB,NPDJ,NPCC
0018          EQUIVALENCE (IBUF(2),RBUF),(LU1,IGO(4)),(CF,AXBUF(52))
0019   C-----
0020   C-----MAXIMUM:ELEMENTS:350...POINTS NODAUX:200...POINTS NON LIBRES:60
0021   C-----        EL.BOSS.:60....COUCHES:20....CAS CHARGEMENT:9
0022   C-----
0023   C-----
0024   C----NOMBRE SECTEURS IFIL:48*(NPAUX-NPT+NPCC-NPB)+2+(10*NP-1)/128
0025   C----+(12*NE-1)/128
0026   C-----
0027          CALL RMPAR(IGO)
0028   C----   IGO(1): CALCUL INITIAL(+-1) CALCUL CONTINUATION(+-2)
0029   C----            TRACE CONTRAINTES(3)///IL SERA NEGATIF SI L'ON
0030   C----            DESIRE LAISSER STOCKES LES RESULTATS INTERMEDIAIRES
0031   C----   IGO(2): TRACE DU SCHEMA DES ELEMENTS(0,1)
0032   C----   IGO(3): UN.LOG.LECTURE+100*UN.LOG.LECTURE TITRE ET FICHIER STOCK.
0033   C----   IGO(4): UN.LOG.ECRITURE
0034   C----   IGO(5):1,SI IGO(1) NEGATIF;0,SI IGO(1) POSITIF
0035   C----
0036          IF(IGO(5).EQ.1)IGO(1)=-IGO(1)
0037          MXE=350
0038          MXP=200
0039          MXR=60
0040          INAM(1)=2HFL
0041          INAM(2)=2HF1
0042          INAM(3)=2H
0043          LU=IGO(3)/100
0044   C-----LECTURE DU TITRE ET DES DONNEES GENERALES
0045          READ(LU,10)(LBUF(J),J=1,36)
0046          IF(LU1.EQ.6)CALL EXEC(3,11068,-1)
0047          WRITE(LU1,20)MXE,MXP,MXR,(LBUF(J),J=1,36)
0048    10    FORMAT(36A2)
0049    20    FORMAT(5/,X,"*PROGRAMME ,ELF, (ELEMENTS FINIS NON LINEAIRES(FLE"
0050         C"XION ET EFFORTS DANS LE PLAN))*",
0051         C2/,X"NOMBRE ELEMENTS(="I5,/X"NOMBRE POINTS NODAUX(="I5,
0052         C/X"NOMBRE POINTS NON LIBRES(="I5,
0053         C4/,X"TITRE:"/,X,36A2)
0054          IFIL(3)=2H
0055          READ(LU,10)IFIL
0056          LU=MOD(IGO(3),100)
0057          WRITE(LU1,22)IFIL
0058    22    FORMAT(5/,X"FICHIER DU DISQUE POUR STOCKAGE FINAL:"3A2)
0059          IF(IFIL(1).EQ.2H  )GOTO25
0060          CALL EXEC(18,IFIL,ISECT)
0061          IF(ISECT.NE.0)GOTO25
0062          WRITE(LU1,23)
0063   23     FORMAT(2/,"FICHIER NON TROUVE")
0064   C****
0065          STOP1003
0066   C****
0067   25     CALL EXEC(11,IHEUR)
0068          WRITE(LU1,26)(IHEUR(I),I=4,2,-1)
0069    26    FORMAT(3/,X"HEURES  :"I5,/X"MINUTES :"I5/X"SECONDES:"I5)
0070   28     READ(LU,*)NE,NB,NP,NR,NITER,NCAP,NCAPB
0071          WRITE(LU1,30)NE,NB,NP,NR,NCAP,NCAPB,NITER
0072          TOLER=0.
0073    30    FORMAT(2/,X"N.ELEMENTS:"10X,I4,/,X,"N ELEM.BOSSAGE:"6X,I4,/,X,
0074         C"N.POINTS NODAUX:"5X,I4,/,X
0075         C"N.POINTS NON LIBRES:"X,I4,/X"N.COUCHES DALLE:"5X,I4,/X"NMAX."
0076         C"COUCHES BOSSAGE:"I4,2/,X,"NITER:"I5,
0077   C-----LECTURE DES CARACTERISTIQUES DU BETON ET DE L'ACIER
0078          READ(LU,*)EB,VU,FB,ESP,EA,FA,DA,TO
```

```
0079          WRITE(LU1,40)EB,VU,FB,ESP,EA,FA,DA,TO
0080    40    FORMAT(3/,X"MATERIAUX:"2/,X"BETON:"/,X"MOD.ELASTICITE INITIAL"
0081         C"(KG/CM2):",3X,F10.2,/,X"MODULE POISSON(COMPRESSION UNIAXIALE):"
0082         C,F6.2,/,X"RES.COMPRESSION UNIAXIALE(KG/CM2):"
0083         CF10.2,/,X"EPAISSEUR DALLE(CM):"14X,
0084         CF10.2,2/,X"ACIER"/X"MOD.ELASTICITE(KG/CM2):"4X,F10.2,/,X,
0085         C"RESISTANCE ULTIME(KG/CM2):"F11.2,/,X"DEFORMATION ULTIME:"8X,
0086         CF10.3,4/,X"COMPRESSION INITIALE DU BETON(KG/CM2):"F10.2)
0087   C-----LECTURE DES DONNEES CONCERNANT LES ELEMENTS
0088    150   DO 200 I=1,NE
0089    200   READ(LU,*)K,(NPE(J,I),J=1,3)
0090          WRITE(LU1,210)(I,(NPE(J,I),J=1,3),I=1,NE)
0091    210   FORMAT(3/,X"ELEMENTS:"2/
0092         C,X,3("NUMERO:"3X"I"5X"J"5X"K"6X)
0093         C,/,500(X,3(I4,I7,2I6,6X),/))
0094   C-----LECTURE DES COORDONNEES DES POINTS NODAUX ET MISE A ZERO DU
0095   C-----VECTEUR "CHARG"
0096   C----- LES COORDONNEES DU CENTRE DE SYMETRIE SONT(0,0)
0097          J=1
0098          DO 220 I=1,NP
0099          DO215 K=1,5
0100          CHARG(J)=0.
0101   215    J=J+1
0102    220   READ(LU,*)L,(JCOOR(K,I),K=1,2)
0103          WRITE(LU1,230)(I,(JCOOR(K,I),K=1,2),I=1,NP)
0104    230   FORMAT(3/,X"POINTS NODAUX:"2/,X,3("NUMERO:"4X"X(CM):"4X"Y(CM):"
0105         C,8X),2/,500(X,3(I4,X,2I10,8X),/))
0106          IF(IGO(1).EQ.3)GOTO239
0107   C----LECTURE COUCHES BOSSAGE
0108          DO235 I=1,NB
0109          LBUF(I)=I+NE-NB
0110   235    READ(LU,*)K,MCAP(I)
0111          WRITE(LU1,236)(LBUF(I),MCAP(I),I=1,NB)
0112    236   FORMAT(3/,3(" N.ELEM.BOSSAGE:"X"N.COUCHES:",3X)/200(3(X,I14,
0113         C,I11,4X)/))
0114   C----LECTURE DES DONNEES DES COUCHES
0115          DO 237 I=1,NCAPB
0116   237    READ(LU,*)K,EPZ(I),ZCOOR(I)
0117          WRITE(LU1,238)(I,EPZ(I),ZCOOR(I),I=1,NCAPB)
0118   238    FORMAT(3/," COUCHE:"3X"EPAISSEUR(CM):"3X"C.D.G.(CM):"/20
0119         C(I8,F17.5,F14.3/))
0120   239    CALL EXEC(17,IWO(1),IWO(2),IWO(3))
0121          M=IWO(2)+1-IWO(1)
0122   C****
0123          IF(IWO(3).NE.48)STOP1004
0124   C****
0125          AUX=6144.
0126          NPT=IWO(1)
0127          NPK=NPT+IFIX((NCAP*(NE-NB)+NCAPB*NB)*10./AUX)+1
0128          NPISP=NPK+IFIX(NP*1000./AUX)+1
0129          NPAUX=NPISP+IFIX(NP*20./AUX)+1
0130          NPKP=NPAUX+NPISP-NPK
0131          NPB=NPKP+IFIX(NE*450./AUX)+1
0132          NPDJ=NPB+IFIX(NE*54./AUX)+1
0133          NPCC=NPDJ+IFIX((NCAP*(NE-NB)+NCAPB*NB)*18./AUX)+1
0134          N=NPCC+1
0135          N=N+1-IWO(1)
0136          IF(M.GE.N)GOTO270
0137          WRITE(LU1,260)N,M
0138    260   FORMAT(3/,X"WORK AREA PLEINE;NOMBRE PISTES DESIREES:"I4,
0139         C2X"NOMBRE PISTES DISPONIBLES:"I4)
0140   C****
0141          STOP 1005
0142   C****
0143    270   IWO(2)=IWO(1)+N-1
0144          IWO(4)=NPCC+1
0145          IWO(5)=0
0146          IWO(6)=0
0147          DO271 I=1,3
0148          IWO1(I)=IWO(I)
0149          IWO2(I)=IWO(I)
0150          IWO3(I)=IWO(I)
0151   271    IWO4(I)=IWO(I)
0152          IOFF=0
0153          N=NPAUX-NPT+NPCC-NPB
0154          N=N*48+2+(10*NP-1)/128+(12*NE-1)/128
0155          IF(N.LE.ISECT)GOTO278
0156          WRITE(LU1,277)ISECT,N
0157   277    FORMAT(2/,X"NOMBRE SECTEURS IFIL:"I5,4X,"NOMBRE NECESSAIRE"
0158         C" DE SECTEURS:"I5)
```

```
0159  C****
0160        STOP1006
0161  C****
0162  278   IF(IGO(1).EQ.3)GOTO288
0163  C-----LECTURE REHFORCEMENTS ACIERS
0164        READ(LU,*)CF(1),CF(2)
0165        WRITE(LU1,241)CF(1),CF(2)
0166  241   FORMAT(3/,X"COEF.ACIERS TRANSVERSAUX(INF,SUP)="2F10.3,3/,
0167       CX"ELEMENTS REHFORCES:  CI-1  CI-2  CS-1  CS-2")
0168        DO248 I=1,NE
0169        READ(LU,*)IBUF(1),(RBUF(J),J=1,4)
0170        IF(IBUF(1).EQ.0)GOTO245
0171        WRITE(LU1,243)IBUF(1),(RBUF(J),J=1,4)
0172  243   FORMAT(I19,X,4F6.2)
0173        GOTO246
0174  245   IBUF(1)=10000
0175  246   CALL BWR(2,IWO,IBUF,9)
0176        IF(IBUF(1).EQ.10000)GOTO249
0177  248   CONTINUE
0178  249   IWO(4)=HPCC
0179        IWO(5)=0
0180        IWO(6)=0
0181  C-----LECTURE DES RESTRICTIOHS DE MOUVEMENTS
0182        DO 240 I=1,NR
0183   240  READ(LU,*)(ILM(J,I),J=1,2)
0184        WRITE(LU1,250)((ILM(J,I),J=1,2),I=1,NR)
0185   250  FORMAT(3/,X"MOUVEMENTS EMPECHES:"2/,X,3("P.NODAL:"5X"CODE:"
0186       C,10X)2/,500(X,3(I4,I13,11X)/))
0187  C-----LECTURE DES CHARGES ET STOCKAGE DANS L,AIRE DE TRAVAIL
0188        WRITE(LU1,280)
0189   230  FORMAT(3/,X"CHARGES:"2/,X"INCREMENT CHARGES:"4X"P.NODAL",5X
0190       C"X(KG)"7X"Y(KG)"7X"P(KG)"7X"TX(KG*CM)"7X"TY(KG*CM)")
0191        DO285 I=1,NP
0192        READ(LU,*)LBUF(I),(TBUF(J,I),J=1,5)
0193        IF(LBUF(I).EQ.0)GOTO286
0194  285   CONTINUE
0195  286   K=I
0196   288  PAUSE 0000
0197        READ(LU,*)JCO,NC
0198        IF(IGO(1).EQ.3)GOTO401
0199        DO350 I=1,NC
0200        READ(LU,*)AUX
0201        FPRT(I)=AUX
0202        L=JCO+I-1
0203        WRITE(LU1,287)L,AUX
0204   287  FORMAT(2/,I11"...FACTEUR:"F10.2,/)
0205        DO 340 J=1,K
0206        IBUF(1)=LBUF(J)
0207        IF(IBUF(1).EQ.0)GOTO300
0208        DO291 M=1,5
0209  291   RBUF(M)=AUX*TBUF(M,J)
0210        WRITE(LU1,290)L,IBUF(1),RBUF
0211   290  FORMAT(I11,12X,I4,3X,3(F10.3,2X),2(F14.3,2X))
0212        IF(I.NE.1)GOTO 310
0213        DO292 M=-4,0
0214  292   CHARG(5*IBUF(1)+M)=RBUF(5+M)
0215        GOTO310
0216   300  DO301 M=1,5
0217  301   RBUF(M)=0
0218   310  IF(I.NE.1)CALL BWR(2,IWO,IBUF,11)
0219        IF(IBUF(1).EQ.0)GOTO 350
0220   340  CONTINUE
0221  C****
0222        STOP 1010
0223  C****
0224   350  CONTINUE
0225  C****
0226  400   IF(IWO(4).NE.HPCC)STOP1011
0227  C****
0228  401   WRITE(LU1,360)(IWO(J),J=1,3)
0229  360   FORMAT(3/,X"STOCKAGE SUR L'AIRE DE TRAVAIL:"/" IWO(1)="I5
0230       C,6X," IWO(2)="I5,6X" IWO(3)="I5)
0231  C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0232        CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0233        END
0234        END$
```

```
SFLF1  T=00003 IS ON CR00040 USING 00015 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE: 17/11/78
0003          PROGRAM FLF1
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DE L'ETAT INITIAL DE CONTRAINTES ET *
0007   C*     DEFORMATIONS DU BETON.                                    *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION KBUF(6144),RBUF(3072),DBUF(2100),IP(5)
0011          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0012         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0013         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0014         CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0015         CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0016         CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0017          EQUIVALENCE (KBUF,RBUF),(DEF,DBUF),(LU1,IGO(4))
0018   C-----
0019   C-----
0020          CALL RMPAR(IP)
0021          IF(IGO(1).EQ.3)GOTO1200
0022          IF(IABS(IGO(1)).EQ.2)GOTO980
0023          IF(TO.GE.0.)GOTO700
0024          AUX5=TO/EB
0025          AUX0=AUX5*VU*0.9
0026          GOTO900
0027   700    I=1
0028          AUX=EB
0029          AUX1=0.00218
0030    800   AUX0=TO/AUX
0031    810   AUX2=AUX0/AUX1
0032          AUX3=1.+(AUX*AUX1/FB-2.+AUX2)*AUX2
0033          AUX4=TO-AUX*AUX0/AUX3
0034          IF(AUX4.LE.TO*0.00001)GOTO850
0035   C****
0036          IF(AUX4.LT.0.)STOP 1040
0037   C****
0038          AUX0=AUX0+AUX4/(AUX*(1.-AUX2**2)/AUX3**2)
0039          GOTO 810
0040    850   IF(I.EQ.2)GOTO 900
0041          I=2
0042          AUX5=AUX0
0043          AUX=EB/VU
0044          AUX1=0.0008
0045          GOTO 800
0046    900   DO 950 I=1,NE
0047          DEF(1,I)=-AUX5
0048          DEF(2,I)=AUX0
0049          DO945 J=3,6
0050   945    DEF(J,I)=0.
0051    950   CONTINUE
0052          AUX5=-AUX5
0053          WRITE(LU1,960)AUX5,AUX0
0054   960    FORMAT(3/,X"DEF.INIT.--X:"E15.6/" DEF.INIT.--Y:"E15.6)
0055          IWO(4)=NPT
0056          IWO(5)=0
0057          IWO(6)=0
0058          DO982 I=1,NCAPB
0059          AUX=1.
0060          IF(I.LE.2)AUX=EA/EB
0061          RBUF(5*I-4)=-TO*AUX
0062          DO982 J=3,0,-1
0063          RBUF(5*I-J)=0.
0064   982    CONTINUE
0065          DO984 I=1,NE
0066          J=NCAP
0067          IF(I.GT.NE-NB)J=MCAP(I-NE+NB)
0068          CALL BWR(2,IWO,RBUF,10*J)
0069   984    CONTINUE
0070   C-----NUMERO INCREMENT DE CHARGE=1
0071   C-----ITERATION NUMERO 1
0072    980   JC=1
0073          ITER=1
0074          IF(IABS(IGO(1)).NE.2)GOTO 1200
0075   C-----LECT. [TENS],[KT],[ISP],[BF],[DJ],"CHARG" ET "DEF".STOCK.
0076   C-----DANS "IFIL" LORS D,UNE PREALABLE UTILISATION DU PROGRAMME
0077          NN=1
0078          NN=6144
```

```
0079          NS=NM*(NPK-NPT)
0080          ASSIGN 1040 TO ILB
0081          K=0
0082          I=NPT
0083    1000  IWO(4)=I
0084          IWO(5)=0
0085          IWO(6)=0
0086          DO 1020 J=1,NS
0087          CALL EXEC(14,102B,KBUF,NN,IFIL,K)
0088          K=K+NN/128
0089          CALL BWR(2,IWO,KBUF,NN)
0090    1020  CONTINUE
0091          GOTO ILB
0092    1040  ASSIGN 1050 TO ILB
0093          I=NPK
0094          NS=NM*(NPISP-NPK)
0095          GOTO 1000
0096    1050  ASSIGN 1055 TO ILB
0097          I=NPISP
0098          NS=NM*(NPAUX-NPISP)
0099          GOTO 1000
0100    1055  ASSIGN 1058 TO ILB
0101          I=NPB
0102          NS=NM*(NPDJ-NPB)
0103          GOTO1000
0104    1058  ASSIGN 1060 TO ILB
0105          I=NPDJ
0106          NS=NM*(NPCC-NPDJ)
0107          GOTO1000
0108    1060  NS=10*NP
0109          ILB=0
0110    1065  I2=0
0111          ILB=ILB+1
0112    1070  J=MIN0(NS,NN)
0113          CALL EXEC(14,102B,KBUF,J,IFIL,K)
0114          K=K+J/128
0115          IF(MOD(J,128).NE.0)K=K+1
0116          NS=NS-J
0117          DO1080 I1=1,J/2
0118          GOTO(1073,1075),ILB
0119    1073  CHARG(I2+I1)=CHARG(I2+I1)+RBUF(I1)
0120          GOTO1080
0121    1075  DBUF(I2+I1)=RBUF(I1)
0122    1080  CONTINUE
0123          I2=I2+J/2
0124          IF(NS.GT.0)GOTO1070
0125          GOTO(1090,1200),ILB
0126    1090  NS=12*NE
0127          GOTO1065
0128    1200  IF(IGO(2) EQ.0)GOTO2000
0129  C-----TRACE DES ELEMENTS
0130          INAM(2)=2HF2
0131          GOTO 2010
0132  C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0133    2000  INAM(2)=2HF3
0134          IF(IABS(IGO(1)).EQ.2)INAM(2)=2HF6
0135          IF(IGO(1).EQ.3)INAM(2)=2H11
0136          IP(4)=0
0137  2010     CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
0138          END
0139          END$
```

```
SFLF2  T=00003 IS ON CR00040 USING 00010 BLKS R=0000

      FTN4
      C----DATE: 17/11/78
            PROGRAM FLF2
      C*****************************************************************
      C*                                                               *
      C*     PROGRAMME POUR LE TRACE DES ELEMENTS                      *
      C*                                                               *
      C*****************************************************************
            DIMENSION X(2),Y(2),IASC(2),IP(5)
            COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
           CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
           CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
           CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
           CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10) ILM(2,60),
           CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
      C-----
      C-----
            CALL RMPAR(IP)
      C---- OBTENTION DES ESCALES
            X(1)=1.E+30
            X(2)=-1.E+30
            Y(1)=1.E+30
            Y(2)=-1.E+30
            DO10 I=1,NP
            AUX=JCOOR(1,I)
            AUXO=JCOOR(2,I)
            X(1)=AMIN1(X(1),AUX)
            Y(1)=AMIN1(Y(1),AUXO)
            X(2)=AMAX1(X(2),AUX)
            Y(2)=AMAX1(Y(2),AUXO)
   10       CONTINUE
      C****
            IF(ABS(X(1))+ABS(Y(1)).GT.0.1)STOP1060
      C****
      C-----INITIALISATION DU TRACEUR
            CALL PLTLU(10)
            PAUSE 1
            LU=IGO(3)/100
            READ(LU,*)XL,YL
            X(2)=(X(2)-X(1))/XL
            Y(2)=(Y(2)-Y(1))/YL
      C-----"DO" SUR TOUS LES ELEMENTS
            DO1009 I=1,NE
            AUX1=0.1
            AUX3=0.
            AUX4=0.
      C-----ELEMENTS EN BETON
   150      L=3
            DO 200 K=1,3
            M=NPE(1+MOD(K,3),I)
            IF(L.NE.3)GOTO170
            AUX=JCOOR(1,NPE(1,I))/X(2)
            AUXO=JCOOR(2,NPE(1,I))/Y(2)
            CALL PLOT(AUX,AUXO,L)
            L=2
   170      AUX=JCOOR(1,M)/X(2)
            AUXO=JCOOR(2,M)/Y(2)
            CALL PLOT(AUX,AUXO,L)
            AUX3=AUX3+AUX/3.
            AUX4=AUX4+AUXO/3.
   200      CONTINUE
            AUX3=AUX3-0.3
      C-----ECRITURE DES NUMEROS DES POINTS NODAUX
   1011      IF((I.GE.100).OR.(I.LT.10))GOTO1030
            CALL CODE
            WRITE(IASC,1010)I
   1010     FORMAT(I3)
            J=3
            GOTO 1002
   1030     CALL CODE
            WRITE(IASC,1040)I
   1040     FORMAT(I4)
            J=4
            IF(I.GT.9)GOTO 1002
            J=2
            IASC(1)=IASC(2)
   1002     CALL SYMB(AUX3,AUX4,0.15,IASC,0.,J)
   1009     CONTINUE
```

```
C----RESTRICTIONS MOUVEMENTS
 2001 DO 2008 I=1,NR
      J=ILM(1,I)
      AUX=JCOOR(1,J)/X(2)
      AUXO=JCOOR(2,J)/Y(2)
      CALL SYMB(AUX,AUXO,0.25,2,0.,-1)
 2008  CONTINUE
      CALL PLOT(0.,0.,3)
C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
      INAM(2)=2HF3
      IF(IABS(IGO(1)).EQ.2)INAM(2)=2HF7
      IF(IGO(1).EQ.3)INAM(2)=2H11
      IP(4)=0
2010  CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4))
      END
      END$
```

```
SFLF3  T=00003 IS ON CR00040 USING 00017 BLKS R=0000

FTN4
C------DATE:  4/12/78
      PROGRAM FLF3
C*****************************************************************
C*                                                               *
C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DE LA MATRICE [BF] DE FLEXION  *
C*     STOCKAGE DE CETTE MATRICE-CI,                             *
C*     DANS L,AIRE DU TRAVAIL DU DISQUE.                         *
C*                                                               *
C*****************************************************************
      DIMENSION IBUF(54),E(3),X(3,3),Y(3,3),F(3),G(3),AB(3,6),T(6,9),
     CABT(3,9),IP(5)
      COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
     CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
     CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
     CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
     CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
     CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
      EQUIVALENCE (IBUF,ABT),(LU1,IGO(4))
C-----
C-----
      CALL RMPAR(IP)
      CALL EXEC(2,1B,INAM,-6)
C-----INITIALISATION DES CONTROLES
      IWO(4)=NPB
      IWO(5)=0
      IWO(6)=0
C-----OBTENTION [BF]
      DO6000 I=1,NE
      XX=0.
      YY=0.
      DO100 J=1,3
      XX=XX+JCOOR(1,NPE(J,I))/3.
      YY=YY+JCOOR(2,NPE(J,I))/3.
 100   CONTINUE
      XI=JCOOR(1,NPE(1,I))-XX
      XJ=JCOOR(1,NPE(2,I))-XX
      XK=JCOOR(1,NPE(3,I))-XX
      YI=JCOOR(2,NPE(1,I))-YY
      YJ=JCOOR(2,NPE(2,I))-YY
      YK=JCOOR(2,NPE(3,I))-YY
      BI=YJ-YK
      CI=XK-XJ
      AI=XJ*YK-XK*YJ
      BJ=YK-YI
      CJ=XI-XK
      BK=YI-YJ
      CK=XJ-XI
      AREA=1.5*AI
      E(1)=AI*(BI*BJ+BJ*BK+BK*BI)
      E(2)=AI*(CI*BJ+BI*CJ+CJ*BK+BJ*CK+CK*BI+BK*CI)
      E(3)=AI*(CI*CJ+CJ*CK+CK*CI)
      X(1,1)=BI*BI*AI+2.*AI*BI*BJ
      X(1,2)=BJ*BJ*AI+2.*AI*BJ*BK
      X(1,3)=BK*BK*AI+2.*AI*BK*BI
      Y(1,1)=BI*BI*AI+2.*AI*BI*BK
      Y(1,2)=BJ*BJ*AI+2.*AI*BJ*BI
      Y(1,3)=BK*BK*AI+2.*AI*BK*BJ
      X(2,1)=2.*AI*(BI*CI+BJ*CI+BI*CJ)
      X(2,2)=2.*AI*(BJ*CJ+BK*CJ+BJ*CK)
      X(2,3)=2.*AI*(BK*CK+BI*CK+BK*CI)
      Y(2,1)=2.*AI*(BI*CI+BK*CI+BI*CK)
      Y(2,2)=2.*AI*(BJ*CJ+BI*CJ+BJ*CI)
      Y(2,3)=2.*AI*(BK*CK+BJ*CK+BK*CJ)
      X(3,1)=AI*(CI*CI+2.*CI*CJ)
      X(3,2)=AI*(CJ*CJ+2.*CJ*CK)
      X(3,3)=AI*(CK*CK+2.*CK*CI)
      Y(3,1)=AI*(CI*CI+2.*CI*CK)
      Y(3,2)=AI*(CJ*CJ+2.*CJ*CI)
      Y(3,3)=AI*(CK*CK+2.*CK*CJ)
      F(1)=(BK-BJ)/2.
      F(2)=(BI-BK)/2.
      F(3)=(BJ-BI)/2.
      G(1)=(CK-CJ)/2.
      G(2)=(CI-CK)/2.
      G(3)=(CJ-CI)/2.
      DO190 II=1,3
      AUX=-2.
```

```
0079          K=1
0080          IF(II.EQ.1)GOTO150
0081          K=3
0082          IF(II.EQ.2)GOTO150
0083          AUX=2.
0084          K=2
0085    150    DO180 J=2,6,2
0086          L=J/2
0087          AUX1=BK
0088          AUX2=BJ
0089          AUX3=CK
0090          AUX4=CJ
0091          IF(L.EQ.1)GOTO155
0092          AUX1=BI
0093          AUX2=BK
0094          AUX3=CI
0095          AUX4=CK
0096          IF(L.EQ.2)GOTO155
0097          AUX1=BJ
0098          AUX2=BI
0099          AUX3=CJ
0100          AUX4=CI
0101    155   AB(II,J-1)=(X(K,L)*AUX1-Y(K,L)*AUX2+E(K)*F(L))*AUX
0102          AB(II,J)=(X(K,L)*AUX3-Y(K,L)*AUX4+E(K)*G(L))*AUX
0103    180   CONTINUE
0104    190   CONTINUE
0105          DO 200 II=1,6
0106          DO 200 J=1,9
0107   200    T(II,J)=0.
0108          T(1,2)=1.
0109          T(2,3)=1.
0110          T(3,5)=1.
0111          T(4,6)=1.
0112          T(5,8)=1.
0113          T(6,9)=1.
0114          AUX=2.*AREA
0115          T(1,1)=CI/AUX
0116          T(1,4)=CJ/AUX
0117          T(1,7)=CK/AUX
0118          T(2,1)=-BI/AUX
0119          T(2,4)=-BJ/AUX
0120          T(2,7)=-BK/AUX
0121          DO250 II=3,5,2
0122          DO250 J=1,7,3
0123          T(II,J)=T(1,J)
0124          T(II+1,J)=T(2,J)
0125   250    CONTINUE
0126          CALL PMM(AB,T,3,6,9,ABT)
0127          AUX=8.*AREA**3
0128          DO260 II=1,3
0129          DO260 J=1,9
0130   260    ABT(II,J)=ABT(II,J)/AUX
0131          CALL BWR(2,IWO,IBUF,54)
0132    6000   CONTINUE
0133   C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
0134          INAM(2)=2HF4
0135          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0136          END
0137   C----
0138   C-----SUBROUTINE "PMM" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)=(C)
0139   C-----
0140          SUBROUTINE PMM(A,B,N1,N2,N3,C)
0141          DIMENSION A(N1,N2),B(N2,N3),C(N1,N3)
0142          DO 20 I=1,N1
0143          DO 20 K=1,N3
0144          Z=0.
0145          DO 10 L=1,N2
0146    10    Z=Z+A(I,L)*B(L,K)
0147    20    C(I,K)=Z
0148          END
0149          END$
```

```
SFLF4  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

0001    FTN4
0002   C-----DATE: 16/ 1/79
0003         PROGRAM FLF4
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DE LA MATRICE RAIDEUR TANGENTE  *
0007   C*     DES ELEMENTS EN BETON.STOCKAGE SUR L,AIRE DE TRAVAIL DU DISQUE *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010         DIMENSION RK(15,15),RBUF(5),RK0(9,9),D(3,3),E(3),ER(3),V(2),
0011        CTD(3,3),T(3,3),B(3,6),DB(3,9),BT(6,3),IP(5),C1(3,3),C4(3,3),
0012        CC3(3,3),DF(3),BF(3,9),BFT(9,3),RK1(6,6),RK2(6,9)
0013        C,NBUF(9),SBUF(4),CF(2)
0014         COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0015        CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0016        CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0017        CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0018        CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0019        CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NFCC
0020         EQUIVALENCE(LU1,IGO(4)),(RK0,RK1),(RK0,RK2)
0021        C,(CF,AXBUF(52)),(NBUF(2),SBUF)
0022   C-----
0023   C-----
0024         CALL RNPAR(IP)
0025         CALL EXEC(2,1B,INAM,-6)
0026   C-----INITIALISATION DES CONTROLES
0027         IWO(4)=NPT
0028         IWO1(4)=NPDJ
0029         IWO2(4)=NPKP
0030         IWO3(4)=NPB
0031         IWO4(4)=NFCC+1
0032         DO11 I=5,6
0033         IWO(I)=0
0034         IWO1(I)=0
0035         IWO2(I)=0
0036         IWO4(I)=0
0037   11     IWO3(I)=0
0038   C****
0039         IF(VU.NE.0.2)STOP1170
0040   C****
0041         CALL BWR(1,IWO4,NBUF,9)
0042   C-----*DO*POUR TOUS LES ELEMENTS
0043         DO 2000 I=1,NE
0044         DO2 J=1,3
0045         DO2 K=1,3
0046         C1(J,K)=0.
0047         C4(J,K)=0.
0048   2     C3(J,K)=0.
0049         JCA=NCAP
0050         IF(I.GT.NE-NB)JCA=MCAP(I-NE+NB)
0051         DO 450 ICA=1,JCA
0052         CALL BWR(1,IWO,RBUF,10)
0053         AUX=ZCOOR(ICA)
0054         DF(1)=DEF(1,I)+DEF(4,I)*AUX
0055         DF(2)=DEF(2,I)+DEF(5,I)*AUX
0056         DF(3)=DEF(3,I)-DEF(6,I)*AUX
0057         IF(ICA.GT.2)GOTO20
0058         DO9 J=1,3
0059         DO9 K=1,3
0060   9     D(J,K)=0.
0061         DO10 J=1,2
0062         D(J,J)=EA
0063         IF(ABS(DF(J)).GT.FA/EA)D(J,J)=0.
0064   10    CONTINUE
0065         GOTO400
0066   C-----COUCHES EN BETON
0067   C-----OBTENTION DE LA MATRICE (D) TANGENTE
0068   20    IF(RBUF(5) NE.0.)GOTO 200
0069   C%%%%
0070   C%%%% IF(ICA GT NCAP)GOTO200
0071   C%%%%
0072   C-----BETON NON FISSURE
0073   C-----OBTENTION DE "ALFA" POUR LES DIRECTIONS PRINCIPALES
0074         CALL CPRIN(RBUF(1),RBUF(2),RBUF(3),T1,T2,ALFA)
0075         C2=COS(ALFA)**2
0076         S2=SIN(ALFA)**2
0077         SC=SIN(ALFA)*COS(ALFA)
0078   C---- T2)=T1(VALEUR ARITMETIQUE) ALFA CORRESPOND A T1
```

```
      IF(T1.LE.T2)GOTO 30
      J=-1
      IF(ALFA.LE.0.)J=1
      ALFA=ALFA+3.141592/2.*J
      AUX=S2
      S2=C2
      C2=AUX
      SC=-SC
      AUX=T1
      T1=T2
      T2=AUX
30    E(1)=EB
      E(2)=EB
      V(1)=VU
      V(2)=VU
      IF((T1.EQ.0.).AND.(T2.EQ.0.))GOTO100
      IF(ABS(T2/T1).LT.0.01)T2=0.01*T1
      A=T2/T1
      IF(T1.EQ.0.)A=1.E+20
      IF((T1.GE.0.).AND.(T2.GE.0.))GOTO60
      IF(A.GE.-0.50)GOTO80
C-----DOMAINE LINEAIRE
60    V(1)=VU*(0.9-0.05/A)
      IF(A.GT.0.)V(1)=0.9*VU
      V(2)=V(1)
      GOTO 100
C-----DOMAINE NON LINEAIRE
80    CALL ROT(T1,T2,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
      E(1)=C2*DF(1)+S2*DF(2)+SC*DF(3)
      E(2)=S2*DF(1)+C2*DF(2)-SC*DF(3)
      E(3)=2*SC*(DF(2)-DF(1))+(C2-S2)*DF(3)
      IF(ABS(E(3)).GT.1.E-06)WRITE(LU1,81)I,ALFA,E(1),E(2),E(3),ICA
81    FORMAT(/X,"EXY$0:"3X"EL:"I5,4X"ALF:"F10.6"DEF.PRINC.(X,Y,XY):"
     C3(E10.4,4X),/," COUCHE"I5)
      EBJ=EB/(1.-VU*A)
      AUX=-EB/(VU*(1.+A))
      AUX0=T1/AUX
85    AUX2=AUX0/ER(3)
      AUX3=1.+(AUX*ER(3)/SR1-1.-GA+AUX2*GA)*AUX2
      AUX4=T1-AUX*AUX0/AUX3
      IF(ABS(AUX4).LE.ABS(T1)*0.00001)GOTO86
C****
      IF(AUX4.GT.0.)STOP1773
C****
      AUX0=AUX0+AUX4/(AUX*(1.-GA*AUX2**2)/AUX3**2)
      GOTO85
86    E(3)=AUX0
      DO 90 J=1,3
      AUX0=AMIN1(1.,E(J)/ER(J))
      E(J)=EBJ*(1.-GA*AUX0**2)/(1.+(EBJ*ER(J)/SR1
     C-1.-GA)*AUX0+GA*AUX0**2)**2
      IF((J.EQ.1).AND.(A.EQ.VU))J=2
      IF(J.EQ.1)EBJ=EB/(A-VU)
      IF(J.EQ.2)EBJ=-EB/(VU*(1.+A))
 90   CONTINUE
      V(1)=E(1)/(E(1)*A-E(3)*(1.+A))
      E(1)=-V(1)*E(3)*(1.+A)
      IF(A.EQ.VU)GOTO95
      V(2)=E(2)*A/(E(2)-E(3)*(1.+A))
      E(2)=-V(2)*E(3)*(1.+A)
      GOTO100
95    V(2)=A
      E(2)=E(1)*A/V(1)
C-----MATRICE(D) ORTHOTROPE REPEREE AUX DIRECTIONS PRINCIPALES
C-----DES CONTRAINTES
 100  AUX=E(1)/(1.-V(1)*V(2))
      D(1,1)=AUX
      D(1,2)=AUX*V(2)
      D(1,3)=0
      D(2,2)=AUX*V(2)/V(1)
      D(2,3)=0.
      D(3,3)=E(1)/(1.+2.*V(1)+V(1)/V(2))
      DO 120 J=2,3
      DO 120 K=1,J-1
 120  D(J,K)=D(K,J)
C-----PASSAGE AU SYSTEME DE REFERENCE GLOBAL
 130  T(1,1)=C2
      T(1,2)=S2
      T(1,3)=-2*SC
      T(2,1)=S2
```

```
0159          T(2,2)=C2
0160          T(2,3)=2*SC
0161          T(3,1)=SC
0162          T(3,2)=-SC
0163          T(3,3)=C2-S2
0164          CALL PMM(T,D,3,3,3,TD)
0165          CALL PMMT(TD,T,3,3,3,D)
0166          GOTO 400
0167    C-----BETON FISSURE EN DEUX DIRECTIONS
0168     200  DO 210 J=1,3
0169          DO210 K=1,3
0170     210  D(J,K)=0.
0171          ASSIGN 130 TO ILB1
0172          S2=1.
0173          C2=0.
0174          SC=0.
0175    C%%%%
0176    C%%%% IF(ICA.LE.NCAP)GOTO215
0177    C%%%% ASSIGN 300 TO ILB1
0178    C%%%% IF(RBUF(5).EQ.0.)GOTO260
0179    C%%%% IF(DF(1).GE.0.64*FB**(2./3.)/EB)GOTO212
0180    C%%%% D(2,2)=EB
0181    C%%%% WRITE(LU1,251)I,ICA,DF(1)
0182    C%212 IF(DF(1).LT.0.004)D(3,3)=0.15*EB*(1.-DF(1)/0.004)
0183    C%%%% GOTO305
0184    C%%%%
0185     215  ALFA=RBUF(4)
0186          IF(ALFA.GT.900.)ALFA=ALFA-1000.
0187          IF(ALFA.GT.90.)ALFA=ALFA-180.
0188          IF(RBUF(4).LT.900.)GOTO250
0189     216  ASSIGN 240 TO ILB
0190     220  ALFA=ALFA*3.141592/180.
0191          C2=COS(ALFA)**2
0192          S2=SIN(ALFA)**2
0193          SC=SIN(ALFA)*COS(ALFA)
0194          GOTO ILB
0195     240  AUX0=C2*DF(1)+S2*DF(2)+SC*DF(3)
0196          DO 245 III=1,2
0197          IF(AUX0.GE.0.64*FB**(2./3.)/EB)GOTO244
0198          D(III,III)=EB
0199          WRITE(LU1,251)I,ICA,AUX0
0200          WRITE(LU1,243)III
0201     243  FORMAT(" FISSURE"I2)
0202     244  AUX0=S2*DF(1)+C2*DF(2)-SC*DF(3)
0203     245  CONTINUE
0204          GOTO130
0205    C-----BETON FISSURE EN UNE DIRECTION
0206    250   ASSIGN 260 TO ILB
0207          GOTO 220
0208     260  T2=S2*RBUF(1)+C2*RBUF(2)-2.*SC*RBUF(3)
0209    C%%%%
0210    C%%%% IF(ICA.GT.NCAP)GOTO263
0211    C%%%%
0212          AUX0=C2*DF(1)+S2*DF(2)+SC*DF(3)
0213          IF(AUX0.GE.0.64*FB**(2./3.)/EB)GOTO262
0214    C****
0215          D(1,1)=EB
0216          WRITE(LU1,251)I,ICA,AUX0
0217     251  FORMAT(//"  ATTENTION....FISSURE FERMEE!!!...ELEMENT"I5,
0218         C3X,"COUCHE"I5,3X"AUX0="E12.4)
0219     262   CONTINUE
0220    C****
0221          IF(AUX0.LT.0.004)D(3,3)=0.15*EB*(1.-AUX0/0.004)
0222    263   D(2,2)=EB
0223          IF(T2.GE.0.)GOTOILB1
0224          ER(2)=-0.00218
0225          SR1=-FB
0226          E(2)=S2*DF(1)+C2*DF(2)-SC*DF(3)
0227    C****
0228          IF(E(2).GE.0.)STOP1176
0229    C****
0230          AUX0=E(2)/ER(2)
0231    C****
0232          IF(EB*ER(2)/SR1-2..LT.0.)STOP1174
0233    C****
0234          D(2,2)=EB*(1.-AUX0**2)/(1.+(EB*ER(2)/SR1-2.)*AUX0
0235         C+AUX0**2)**2
0236          GOTO ILB1
0237    C%%%%
0238    C%300 D(3,3)=EB/(2.*(1.+VU))
```

```
C%305 D(1,1)=D(2,2)
C%%%% D(2,2)=EB
C%%%% GOTO400
C%%%%
C----OBTENTION [C] ET STOCKAGE [D]
400     AUX=EPZ(ICA)
        CUX=1.
        CUX0=1.
        IF(ICA.GT.2)GOTO408
        CUX0=CF(ICA)
        IF(I.NE.NBUF(1))GOTO408
        CUX=CUX*SBUF(2*ICA-1)
        CUX0=CUX0*SBUF(2*ICA)
408     AUX0=ZCOOR(ICA)+AUX/2.
        AUX1=AUX0-AUX
        AUX2=0.5*(AUX0**2-AUX1**2)
        AUX3=(AUX0*AUX0*AUX0-AUX1*AUX1*AUX1)/3.
        DO415 J=1,3
        DO410 K=1,3
        C1(J,K)=C1(J,K)+CUX*D(J,K)*AUX
        C4(J,K)=C4(J,K)+CUX*D(J,K)*AUX2
410     C3(J,K)=C3(J,K)+CUX*D(J,K)*AUX3
        CUX=CUX0
415     CONTINUE
        CALL BWR(2,IW01,D,18)
450     CONTINUE
C---OBTENTION MATRICE RAIDEUR
        CALL MATB(NPE(1,I),NPE(2,I),NPE(3,I),JCOOR,B,AREA)
        CALL MTR(B,3,6,BT)
        CALL BWR(1,IW03,BF,54)
        CALL MTR(BF,3,9,BFT)
        CALL PMM(C1,B,3,3,6,DB)
        CALL PMM(BT,DB,6,3,6,RK1)
        DO500 J=1,3
        L=5*(J-1)
        DO500 K=1,3
        M=5*(K-1)
        DO500 IJ=1,2
        DO500 IK=1,2
        RK(L+IJ,M+IK)=RK1(2*(J-1)+IJ,2*(K-1)+IK)*AREA
500     CONTINUE
        CALL PMM(C3,BF,3,3,9,DB)
        CALL PMM(BFT,DB,9,3,9,RK0)
        DO510 J=1,3
        L=5*J-3
        DO510 K=1,3
        M=5*K-3
        DO510 IJ=1,3
        DO510 IK=1,3
        RK(L+IJ,M+IK)=RK0(3*(J-1)+IJ,3*(K-1)+IK)*AREA
510     CONTINUE
        CALL PMM(C4,BF,3,3,9,DB)
        CALL PMM(BT,DB,6,3,9,RK2)
        DO520 J=1,3
        L=5*(J-1)
        DO 520 K=1,3
        M=5*K-3
        DO520 IJ=1,2
        DO 520 IK=1,3
        RK(L+IJ,M+IK)=RK2(2*(J-1)+IJ,3*(K-1)+IK)*AREA
        RK(M+IK,L+IJ)=RK(L+IJ,M+IK)
520     CONTINUE
        CALL BWR(2,IW02,RK,450)
        IF(I.NE.NBUF(1))GOTO2000
        CALL BWR(1,IW04,NBUF,9)
 2000   CONTINUE
C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
        INAM(2)=2HF5
        CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
        END
C----
C-----
C-----SUBROUTINE "MATB" POUR LA FORMATION DE LA MATRICE "B"
        SUBROUTINE MATB(I,J,K,JCOOR,B,AREA)
        DIMENSION JCOOR(2,1),B(3,6)
        XI=JCOOR(1,I)
        YI=JCOOR(2,I)
        XJ=JCOOR(1,J)
        YJ=JCOOR(2,J)
        XK=JCOOR(1,K)
```

```
0319          YK=JCOOR(2,K)
0320          AREA=0.5*(XJ*YK+XI*YJ+XK*YI-(XJ*YI+XK*YJ+XI*YK))
0321    C****
0322          IF(AREA.LE.0.)STOP27
0323    C****
0324          AUX=2.*AREA
0325          BI=(YJ-YK)/AUX
0326          BJ=(YK-YI)/AUX
0327          BK=(YI-YJ)/AUX
0328          CI=(XK-XJ)/AUX
0329          CJ=(XI-XK)/AUX
0330          CK=(XJ-XI)/AUX
0331          B(1,1)=BI
0332          B(1,2)=0.
0333          B(1,3)=BJ
0334          B(1,4)=0.
0335          B(1,5)=BK
0336          B(1,6)=0.
0337          B(2,1)=0.
0338          B(2,2)=CI
0339          B(2,3)=0.
0340          B(2,4)=CJ
0341          B(2,5)=0.
0342          B(2,6)=CK
0343          B(3,1)=CI
0344          B(3,2)=BI
0345          B(3,3)=CJ
0346          B(3,4)=BJ
0347          B(3,5)=CK
0348          B(3,6)=BK
0349          END
0350    C----
0351    C-----SUBROUTINE "PMM" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)=(C)
0352    C-----
0353          SUBROUTINE PMM(A,B,N1,N2,N3,C)
0354          DIMENSION A(N1,N2),B(N2,N3),C(N1,N3)
0355          DO 20 I=1,N1
0356          DO 20 K=1,N3
0357          Z=0.
0358          DO 10 L=1,N2
0359    10    Z=Z+A(I,L)*B(L,K)
0360    20    C(I,K)=Z
0361          END
0362    C-----
0363    C-----SUBROUTINE "PMMT" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)T=(C)
0364    C-----
0365          SUBROUTINE PMMT(A,B,N1,N2,N3,C)
0366          DIMENSION A(N1,N2),B(N3,N2),C(N1,N3)
0367          DO 20 I=1,N1
0368          DO 20 K=1,N3
0369          Z=0.
0370          DO 10 L=1,N2
0371    10    Z=Z+A(I,L)*B(K,L)
0372    20    C(I,K)=Z
0373          END
0374    C-----
0375    C-----SUBROUTINE "MTR" POUR OBTENIR (C)=(A)T
0376    C-----
0377          SUBROUTINE MTR(A,N1,N2,C)
0378          DIMENSION A(N1,N2),C(N2,N1)
0379          DO 10 I=1,N1
0380          DO 10 K=1,N2
0381    10    C(K,I)=A(I,K)
0382          END
0383    C-----
0384    C-----SUBROUTINE "CPRIN" POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES PRINCIPALES
0385    C-----
0386          SUBROUTINE CPRIN(TX,TY,TXY,T1,T2,ALFA)
0387          T1=0.
0388          T2=0.
0389          ALFA=0.
0390          IF(TX.EQ.TY)GOTO5
0391          ALFA=0.5*ATAN(2.*TXY/(TX-TY))
0392          GOTO 10
0393    5     ALFA=0.5*SIGN(3.141592/2.,TXY)
0394          IF(TXY.EQ.0.)ALFA=0.
0395    10    C2=COS(ALFA)**2
0396          S2=SIN(ALFA)**2
0397          SC=SIN(ALFA)*COS(ALFA)
0398          T1=C2*TX+S2*TY+2*SC*TXY
```

```
0399          T2=S2*TX+C2*TY-2*SC*TXY
0400          END
0401    C----
0402    C-----SUBROUTINE "ROT" POUR OBTENIR LES CONTRAINTES ET DEFORMATIONS
0403    C-----EN RUPTURE
0404    C----
0405          SUBROUTINE ROT(T1,T2,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
0406          DIMENSION ER(3),D(13),E(3,13)
0407          DATA D/1.,.82,.64,.525,.2,.13,0.,-.052,-.07,-.103,-.204,-.35,-.5
0408         C/,E/-2.6,-2.6,3.39,-2.88,-1.96,3.12,-3.,-1.33,2.5,
0409         C-3.08,-0.76,1.96,-3.15,0.,1.64,-3.,0.53,1.33,
0410         C-2.18,0.8,0.8,-1.43,0.6,0.28,-1.23,0.49,.22,
0411         C-0.85,0.29,0.14,-0.46,0.19,0.052,-0.315,0.17,0.04,
0412         C-0.18959,0.12065,0.017235/
0413          A=T2/T1
0414          VU=0.2
0415    C-----CONTROLE T1<=T2 : T1<0; A>-0.5
0416    C****
0417          IF(T1.GT.T2)STOP31
0418    C****
0419          IF(A.LT.-0.50001)STOP33
0420    C****
0421          IF(T1.GE.0.)STOP34
0422    C****
0423    C----OBTENTION CONTRAINTE RUPTURE SR1
0424          AUX0=FB**(1./3.)
0425          IF(A.GT.-1./15.)GOTO10
0426          SR1=0.64*FB/(A*AUX0-0.366157)
0427          GOTO20
0428    10    AUX=3.65
0429          IF(A.LT.0.)AUX=(15.*AUX0-43.05468)/(AUX0+5.49236)
0430          SR1=-(1.+AUX*A)*FB/(1.+A)**2
0431    C----OBTENTION DEFORMATIONS EN RUPTURE
0432    20    GA=AMAX1(0.,AMIN1(1.,1.+10.*A))
0433          RM=FRM(A)
0434          DO30 I=1,13
0435          IF(A.GT.D(I))GOTO40
0436    30    CONTINUE
0437          I=13
0438    40    IF(I.EQ.1)STOP36
0439    C****
0440          RM0=FRM(D(I-1))
0441          RM1=FRM(D(I))
0442          DO60 J=1,3
0443          ER(J)=E(J,I-1)+(E(J,I)-E(J,I-1))/(RM1-RM0)*(RM-RM0)
0444          ER(J)=ER(J)*1.E-03
0445    60    CONTINUE
0446          AUX=EB/(1.-VU*A)
0447          DO90 J=1,3
0448          AUX0=AUX*ER(J)/SR1-1.-GA
0449          IF(AUX0.GE.0.)GOTO80
0450          AUX2=ER(J)
0451          AUX0=AUX0+1.+GA
0452          ER(J)=(1.+GA)*SR1/AUX
0453    80    IF((J.EQ.1).AND.(A.EQ.VU))J=2
0454          IF(J.EQ.1)AUX=EB/(A-VU)
0455          IF(J.EQ.2)AUX=-EB/(VU*(1.+A))
0456    90    CONTINUE
0457          END
0458    C----
0459    C---- FONCTION FRM
0460    C----
0461          FUNCTION FRM(A)
0462          FRM=-1.
0463          IF(A.LT.0.)FRM=3.
0464          PI=3.141592
0465          B=A
0466          IF(A.EQ.0.)B=1.E-20
0467          FRM=(ATAN(1./B)+FRM*PI/4.)/PI*6.4
0468          END
0469          END$
```

```
SFLF5  T=00003 IS ON CR00040 USING 00015 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C-----DATE: 21/11/78
0003          PROGRAM FLF5
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LA FORMATION ET LE STOCKAGE                *
0007   C*     DE LA MATRICE RAIDEUR TANGENTE GLOBALE.                   *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION KBUF(4000),ISP(20,200),IBUF(450)
0011         C,RK(15,15),JBUF(1000),SK(500),IEL(200),IP(5)
0012          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0013         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0015         CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0016         CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0017         CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0018          EQUIVALENCE (KBUF,ISP),(IBUF,RK),(JBUF,SK)
0019   C-----
0020   C-----
0021          CALL RMPAR(IP)
0022          CALL EXEC(2,18,INAM,-6)
0023   C-----MISE A ZERO DES CONTROLES "ISP" STOCKES DANS L,AIRE DE TRAVAIL
0024   C-----'NN' EST LE NOMBRE PLUS GRAND DE FILES DU VECTEUR 'ISP'
0025   C-----QUI EST ADMIS EN MEMOIRE
0026   C----
0027          NN=200
0028   C----
0029          IWO2(4)=NPISP
0030          IWO2(5)=0
0031          IWO2(6)=0
0032          IWO3(4)=IWO2(4)
0033          DO30 I=1,NN
0034          DO30 J=2,20
0035   30     ISP(J,I)=0
0036          DO 100 I=1,NP
0037          K=MOD(I-1,NN)+1
0038          ISP(1,K)=I
0039          IEL(I)=0
0040          IF((MOD(I,NN).NE.0).AND.(I.NE.NP))GOTO100
0041          CALL BWR(2,IWO2,KBUF,20*K)
0042   100    CONTINUE
0043          IWO2(4)=IWO3(4)
0044          IWO2(5)=0
0045          IWO2(6)=0
0046          JN=0
0047          DO110 I=4,6
0048   110    IWO3(I)=IWO2(I)
0049          NF=NP/NN
0050          IF(MOD(NP,NN).NE.0)NF=NF+1
0051          DO450 IN=1,NF
0052          CALL BWR(1,IWO2,KBUF,20*MINO(NN,NP-JN))
0053          IWO(4)=NPKP
0054          IWO(5)=0
0055          IWO(6)=0
0056   C-----"DO" POUR TOUS LES ELEMENTS
0057          DO400 I=1,NE
0058          ND=3
0059          KN=0
0060          IO=0
0061   C-----OBTENTION DE LA LIGNE ET LA COLONNE DE LA MATRICE RAIDEUR GLOBALE
0062          DO 350 J=1,ND
0063          JO=NPE(J,I)
0064          IF((JO.LE.JN).OR.(JO.GT.JN+NN))GOTO345
0065          IF(KN.EQ.0)CALL BWR(1,IWO,IBUF,450)
0066   C-----LECTURE DES LIGNES DE LA MATRICE RAIDEUR COMPACTE GLOBALE
0067   C-----QUI EST EMMAGASINEE DANS L,AIRE DE TRAVAIL DU DISQUE
0068          IF(IEL(JO).EQ.0)GOTO200
0069          IWO1(4)=NPK
0070          IWO1(5)=0
0071          IWO1(6)=0
0072          DO150 M=1,20
0073          CALL SWO(IWO1,IWO1,50*(JO-1))
0074   150    CONTINUE
0075          CALL BWR(1,IWO1,JBUF,1000)
0076          GOTO230
0077   200    IEL(JO)=1
0078          DO 210 M=1,500
```

```
 210    SK(M)=0.
230    I0=I0+1
        I1=0
       DO330 L=1,ND
       I1=I1+1
       IF(J0.GT.NPE(L,I))GOTO329
C-----OBTENTION PREMIER ISP(N,I)VIDE POUR Y STOCKER LE NUMERO DU NOEUD
C-----DANS LA MATRICE GLOBALE DONT LES TERMES SONT EMMAGASINNES
C-----DANS LES COLONNES 'N' ET 'N+1' DE LA MATRICE GLOBALE COMPACTE
       DO310 N=1,20
       IF(ISP(N,J0-JN)-NPE(L,I))305,320,305
305    IF(ISP(N,J0-JN))308,315,310
C****
 308   STOP 1201
C****
 310   CONTINUE
C****
       STOP 1205
C****
315    ISP(N,J0-JN)=NPE(L,I)
C-----ACCUMULATION DE LA RAIDEUR ELEMENTALE
C-----SUR LA MATRICE RAIDEUR COMPACTE
320    DO325 K=0,4
       I2=100*K
       DO324 KK=4,0,-1
324    SK(I2+5*N-KK)=SK(I2+5*N-KK)+RK(I0+K,I1+4-KK)
325     CONTINUE
329    I1=I1+4
 330   CONTINUE
       I0=I0+4
       KN=1
       IW01(4)=NPK
       IW01(5)=0
       IW01(6)=0
       DO 340 M=1,20
       CALL SWO(IW01,IW01,50*(J0-1))
340    CONTINUE
       CALL BWR(2,IW01,JBUF,1000)
       GOTO 350
 345   I0=I0+5
 350   CONTINUE
390    IF(KN.EQ.0)CALL SWO(IW0,IW0,450)
 400   CONTINUE
       CALL BWR(2,IW03,KBUF,20*MINO(NN,NP-JN))
       JN=JN+NN
 450   CONTINUE
C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
       INAM(2)=2HF6
       CALL IXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
       END
       END$
```

```
SFLF6  T=00003 IS ON CR00040 USING 00015 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE:  4/12/78
0003          PROGRAM FLF6
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,INTRODUCTION DES CONDITIONS AUX LIMITES.  *
0007   C*     S'IL S,AGIT DE LA TERMINAISON,POSSIBILITE DE STOCKAGE DE   *
0008   C*     CERTAINES VALEURS SUR UN FICHIER, POUR UNE POSTERIEURE     *
0009   C*     LECTURE,LORS D,UN NOUVEAU PASSAGE DU PROGRAMME.            *
0010   C*                                                               *
0011   C*****************************************************************
0012          DIMENSION KBUF(6144),RBUF(3072),SK(500),
0013          DIMENSION IP(5)
0014          COMMON IS0(5),IW0(6),IW01(6),IW02(6),IW03(6),IW04(6),
0015         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0016         CJC,IDEF,ITER,TT,CE,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0017         CNPC,IDIM,JJ,CHAR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0018         CJCOUR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0019         CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0020          EQUIVALENCE(KBUF,RBUF),(KBUF,SK),(DEF,DBUF)
0021   C-----
0022   C-----
0023          CALL SMPAR(IP)
0024          CALL EXEC(2,18,INAM,-6)
0025   C-----INTRODUCTION DES CONDITIONS AUX LIMITES
0026          IF(ITER.NE.1)GOTO550
0027          IF(JC.GT.NC)GOTO600
0028          DO 500 I=1,NR
0029    50    IW01(4)=NPK
0030          IW01(5)=0
0031          IW01(6)=0
0032          DO150 L=1,20
0033          CALL SWO(IW01,IW01,50*(ILM(1,I)-1))
0034    150   CONTINUE
0035          DO 410 J=4,6
0036    410   IW0(J)=IW01(J)
0037          CALL SWR(1,IW01,KBUF,1000)
0038   C-----EXAMEN DES RESTRICTIONS POSSIBLES DANS LES CINQ SENS
0039          I4=10000
0040          I3=ILM(2,I)
0041          IF(I3.GE.0)GOTO412
0042          ASSIGN 411 TO ILB
0043   C-------ILM(2,I) EN 1E-07 CM
0044          AUX=I3*1.E-07*FPRT(JC)
0045          J=1
0046          GOTO420
0047    411    I3=111
0048   412    ASSIGN 430 TO ILB
0049          AUX=0.
0050          DO490 J=1,5
0051          I2=I3/I4
0052          IF(I2)415,480,420
0053   C****
0054    415   STOP 1401
0055   C****
0056   420    SK(100*(J-1)+J)=SK(100*(J-1)+J)*1.E+20
0057          CHARG(5*(ILM(1,I)-1)+J)=AUX*SK(100*(J-1)+J)
0058          GOTOILB
0059    430    I3=I3-I4
0060    480    I4=I4/10
0061    490   CONTINUE
0062          CALL SWR(2,IW0,KBUF,1000)
0063    500   CONTINUE
0064          IF(JC.EQ.1)GOTO810
0065          GOTO600
0066    550   DO570 I=1,NR
0067          I4=10000
0068          I3=ILM(2,I)
0069          IF(I3.LT.0)I3=10111
0070          DO560 J=1,5
0071          I2=I3/I4
0072          IF(I2)415,555,540
0073    540   CHARG(5*(ILM(1,I)-1)+J)=0.
0074          I3=I3-I4
0075    555   I4=I4/10
0076    560   CONTINUE
0077    570   CONTINUE
0078          GOTO810
```

```
C----STOCKAGE DE [TENS],[KT],[ISP],[BF],[DJ],"CHARG" ET "DEF" DANS
C-----LE FICHIER "IFIL" DU DISQUE
 600    NM=1
        NN=6144
        NS=NM*(NPK-NPT)
        ASSIGN 700 TO ILB
        K=0
        I=NPT
 610    IWO(4)=I
        IWO(5)=0
        IWO(6)=0
        DO 640 J=1,NS
        CALL BWR(1,IWO,KBUF,NN)
        CALL EXEC(15,1028,KBUF,NN,IFIL,K)
        K=K+NN/128
 640    CONTINUE
        GOTO ILB
 700    ASSIGN 710 TO ILB
        I=NPK
        NS=NM*(NPISP-NPK)
        GOTO 610
 710    ASSIGN 711 TO ILB
        I=NPISP
        NS=NM*(NPAUX-NPISP)
        GOTO 610
 711    ASSIGN 713 TO ILB
        I=NPB
        NS=NM*(NPDJ-NPB)
        GOTO610
 713     ASSIGN 715 TO ILB
        I=NPDJ
        NS=NM*(NPCC-NPDJ)
        GOTO610
 715    NS=10*NP
        ILB=0
 720    I2=0
        ILB=ILB+1
 730    J=MIN0(NS,NN)
        DO780 I1=1,J/2
        GOTO(745,760),ILB
 745    RBUF(I1)=CHARG(I2+I1)
        GOTO 780
 760    RBUF(I1)=DBUF(I2+I1)
 780    CONTINUE
        I2=I2+J/2
        CALL EXEC(15,1028,KBUF,J,IFIL,K)
        K=K+J/128
        IF(MOD(J,128).NE.0)K=K+1
        NS=NS-J
        IF(NS.GT.0)GOTO 730
        GOTO(790,800),ILB
790     NS=12*NE
        GOTO 720
C-----TERMINAISON DU PROGRAMME
C****
800     IF(JC.GT.NC)STOP1444
C****
C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
 810    INAM(2)=2HF7
        CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
 9999   END
        END$
```

```
SFLF7  T=00003 IS ON CR00040 USING 00011 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE:  4/12/78
0003          PROGRAM FLF7
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LA RESOLUTION DU SYSTENE PAR UNE           *
0007   C*     METHODE D'ELIMINATION.                                    *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION RBUF(500),IMET(20),IP(5)
0011         C,KSP(20,200),JBUF(6144)
0012          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0013         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0015         CNPE(3,350),ZOOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0016         CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FFRT(10),ILM(2,60),
0017         CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0018          EQUIVALENCE (JBUF,KSP),(RBUF,JBUF(101)),(LU1,IGO(4))
0019   C-----
0020   C-----
0021          CALL RMPAR(IP)
0022          CALL EXEC(2,18,INAM,-6)
0023   C-----LORS DE LA PREMIERE ITERATION , ON REDEFINIT LE VECTEUR ISP
0024   C-----
0025    14    IF(ITER.EQ.1)GOTO20
0026    15    IWO(4)=NPK
0027          IWO(5)=0
0028          IWO(6)=0
0029          IWO1(4)=NPAUX
0030          IWO1(5)=0
0031          IWO1(6)=0
0032          DO18I=1,NPISP-NPK
0033          CALL BWR(1,IWO,JBUF,6144)
0034          CALL BWR(2,IWO1,JBUF,6144)
0035    18    CONTINUE
0036          INAM(2)=2H70
0037          CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0038          GOTO9999
0039    20    NN=200
0040          NT=20
0041          IWO(4)=NPISP
0042          IWO(5)=0
0043          IWO(6)=0
0044          DO25 I=4,6
0045    25    IWO1(I)=IWO(I)
0046          IO=0
0047          DO340 N=1,NP
0048          IF(MOD(N,NN).NE.1)GOTO50
0049          KO=20*MIN0(NN,NP-IO)
0050          CALL BWR(1,IWO,JBUF,KO)
0051          IF(N.NE.1)GOTO50
0052          DO220 M=1,NT
0053     220  IMET(M)=KSP(M,1)
0054          GOTO340
0055    50     DO280 M=2,NT
0056          IF(IMET(M).EQ.0)GOTO300
0057          DO240 L=1,NT
0058          IF(KSP(L,N-IO).EQ.0)GOTO260
0059          IF(KSP(L,N-IO).EQ.IMET(M))GOTO280
0060   240    CONTINUE
0061          WRITE(LU1,250)N,IMET,(KSP(L,N-IO),L=1,NT)
0062   250    FORMAT(/X"'ISP' PLEIN;P.NODAL:"I5/X"IMET:"/2(10I5,/)X
0063         C"KSP:"/2(10I5/))
0064   C****
0065          STOP1601
0066   C****
0067   260    KSP(L,N-IO)=IMET(M)
0068   280    CONTINUE
0069   300    DO320 M=1,NT
0070   320    IMET(M)=KSP(M,N-IO)
0071          IF((MOD(N,NN).NE.0) AND.(N.NE.NP))GOTO340
0072          CALL BWR(2,IWO1,JBUF,KO)
0073          IO=IO+NN
0074   340    CONTINUE
0075          GOTO15
0076   9999   END
0077          END$
```

```
SFL70  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

0001   FTN4
0002   C----DATE:  5/12/78
0003          PROGRAM FL70
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LA RESOLUTION DU SYSTEME PAR UNE           *
0007   C*     METHODE D'ELIMINATION.                                    *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION RBUF(500,13),ISP(20,13),JBUF(260),
0011         CIP(5),IMET(200),SBUF(500),TEMP(5)
0012         C,LSP(20),DEPL(1000),TBUF(500)
0013          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0014          INAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0015          IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0016          IRSE(2,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0017          COORD(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0018          CHPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPOJ,NPCC
0019          EQUIVALENCE (JBUF,ISP),(LU1,IGO(4)),(DEPL,CHARG)
0020         C,(TBUF,RBUF)
0021   C-----
0022   C-----
0023          CALL RMPAR(IP)
0024   C-----
0025          CALL EXEC(2,1B,INAM,-6)
0026   C----
0027   C-----
0028          NT=20
0029          NN=13
0030   C-----
0031    361   IWO(4)=NPAUX
0032          IWO(5)=0
0033          IWO(6)=0
0034          DO360 I=4,6
0035          IWO1(I)=IWO(I)
0036          IWO2(I)=IWO(I)
0037   360    IWO3(I)=IWO(I)
0038          IWO3(4)=NPISP
0039          IL=0
0040          LL=-1
0041          IJK=-1
0042          ASSIGN 369 TOILB
0043   C----BOUCLE SUR LES EQUATIONS
0044          DO520 I=1,5*NP
0045          IF(I.EQ.5*NP)GOTO501
0046          IJK=1+IJK
0047          IF(IJK.EQ.5)IJK=0
0048          II=100*IJK
0049          IF(IJK.NE.0)GOTO364
0050   C---LECTURE SBUF,LSP POUR CHAQUE NOEUD
0051          JJ=(I+4)/5
0052          J=((JJ-1)/NN)*NN
0053          IF(LL.NE.J)GOTO362
0054          DO359 K=1,500
0055    359   SBUF(K)=RBUF(K,JJ-LL)
0056          CALL SWO(IWO1,IWO1,1000)
0057          GOTO363
0058   362    CALL BWR(1,IWO1,SBUF,1000)
0059   363    CALL BWR(1,IWO3,LSP,20)
0060   364    AUX=SBUF(II+1+IJK)
0061          IF(ABS(AUX).LT.1.E-10)GOTO3300
0062          DEPL(I)=DEPL(I)/AUX
0063   C---BOUCLE SUR LES LIGNES A ELIMINER
0064          LL0=LL
0065          DO470 ICOD=0,1
0066          DO460 M=1+ICOD,NT
0067          IF((M.EQ.1).AND.(IJK.EQ.4))GOTO460
0068          IN=LSP(M)
0069          IF(IN)365,470,365
0070   365    IL=((IN-1)/NN)*NN
0071          IF(M.EQ.1)GOTO369
0072          IF(LL.EQ.-1)GOTO368
0073          IF(ICOD.EQ.1)GOTO390
0074          IF(IL.NE.LL0)GOTO460
0075          GOTO369
0076   390    IF(IL.EQ.LL0)GOTO460
0077          IF(IL.EQ.LL)GOTO369
0078          N=2
```

```
0079   366    IWO(4)=NPAUX
0080          IWO(5)=0
0081          IWO(6)=0
0082          DO 367 LKK=1,20
0083          CALL SWO(IWO,IWO,50*LL)
0084    367   CONTINUE
0085          CALL BWR(N,IWO,RBUF,1000*MINO(NP-LL,NN))
0086          IF(N.EQ.1)GOTOILB
0087   368    IWO(4)=NPISP
0088          IWO(5)=0
0089           IWO(6)=0
0090          CALL SWO(IWO,IWO,20*IL)
0091          CALL BWR(1,IWO,ISP,20*MINO(NP-IL,NN))
0092          IF(LL.EQ.-1)LLO=IL
0093          N=1
0094           LL=IL
0095          GOTO366
0096   C---RECHERCHE DES LIGNES APPROPIEES
0097   369    DO380 N=1,NT
0098          IA=ISP(N,IN-LL)
0099          IF(M.EQ.1)IA=LSP(N)
0100          IF(IA)370,400,370
0101   370    IMET(IA)=N
0102   380    CONTINUE
0103   400    DO405 N=-4,0
0104    405   TEMP(5+N)=SBUF(II+5*M+N)/AUX
0105   C----BOUCLE SUR LES COLONNES A ELIMINER
0106          DO420 N=1,NT
0107          IA=LSP(N)
0108          IF(IA)406,440,406
0109   406    IF(IA-IN)420,410,410
0110   410    IM=IMET(IA)
0111          DO416 JJ=0,4
0112          IF((M.EQ.1).AND.(JJ.LE.IJK))GOTO416
0113          DO415 J=-4,0
0114          K=100*JJ+5*IM+J
0115          IF(M.EQ.1)GOTO414
0116          RBUF(K,IN-LL)=RBUF(K,IN-LL)-TEMP(JJ+1)*SBUF(II+5*N+J)
0117          GOTO415
0118   414    SBUF(K)=SBUF(K)-TEMP(JJ+1)*SBUF(II+5*N+J)
0119   415    CONTINUE
0120   416    CONTINUE
0121   420    CONTINUE
0122   C---MODIF.DU VECTEUR CHARG.
0123   440    DO 450 JJ=0,4
0124          IF((M.EQ.1).AND.(4-JJ.LE.IJK))GOTO460
0125    450   DEPL(5*IN-JJ)=DEPL(5*IN-JJ)-DEPL(I)*SBUF(II+5*M-JJ)
0126   460    CONTINUE
0127   470    CONTINUE
0128   C---REDEFIN.LIGNES POUR SUBSTIT. ARRIERE
0129    480   DO500 M=1,NT
0130          DO490 J=0,4
0131          IF((M.EQ.1).AND.(4-J.LE.IJK))GOTO500
0132          SBUF(II+5*M-J)=SBUF(II+5*M-J)/AUX
0133   490    CONTINUE
0134   500    CONTINUE
0135          IF(IJK.NE.4)GOTO520
0136   501    CALL BWR(2,IWO2,SBUF,1000)
0137          JJ=I/5
0138          J=((JJ-1)/NN)*NN
0139          IF(LL.NE.J)GOTO520
0140          DO510 K=1,500
0141   510    RBUF(K,JJ-LL)=SBUF(K)
0142   520    CONTINUE
0143          IWO(4)=NPAUX
0144          IWO(5)=0
0145          IWO(6)=0
0146          DO 529 LKK=1,20
0147          CALL SWO(IWO,IWO,50*LL)
0148    529   CONTINUE
0149          CALL BWR(2,IWO,RBUF,1000*MINO(NP-LL,NN))
0150          ASSIGN 535 TO ILB
0151          IL=((NP-1)/NN)*NN
0152          IF(IL.NE.LL)GOTO368
0153   535    DEPL(5*NP)=DEPL(5*NP)/RBUF(405,NP-LL)
0154          ASSIGN538 TO ILB
0155   C---SUBSTIT ARRIERE
0156          DO560  J=NP,1,-1
0157          IL=((J-1)/NN)*NN
0158          IF(IL.NE.LL)GOTO368
```

```
0159  538    DO550 K=0,4
0160         IJK=100*(4-K)
0161         IM=5*J-K
0162         DO545 M=1,NT
0163         JJ=ISP(M,J-LL)
0164         IF(JJ)540,550,540
0165  540    IN=IJK+5*M
0166         DO542 L=0,4
0167         IF((M.EQ.1).AND.(L.GE.K))GOTO545
0168         DEPL(IM)=DEPL(IM)-RBUF(IN-L,J-LL)*DEPL(5*JJ-L)
0169  542    CONTINUE
0170  545    CONTINUE
0171  550    CONTINUE
0172  560    CONTINUE
0173  C&&&&&
0174         IF(ITER.LE.0)GOTO1999
0175  C&&&&
0176   2000   CONTINUE
0177         WRITE(LU1,2010)
0178  2010    FORMAT(10/)
0179         INAM(2)=2HF8
0180         IP(4)=0
0181         CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0182         GOTO9999
0183   3300   WRITE(LU1,2)I,II,IJK,J,LL,LL0,AUX
0184  C&&&&
0185         GOTO9998
0186  C&&&&
0187   2     FORMAT(5/,X"TERME DIAG. NUL ,LIGNE:"I5/X"II,IJK,J,LL,LL0,AUX:"
0188        C,5I10,F15.5)
0189  C&&&&
0190   1999  IWO1(5)=0
0191         IWO1(6)=0
0192         IWO(5)=0
0193         IWO(6)=0
0194         IWO(4)=NPK
0195         IWO1(4)=NPISP
0196         DO10 I=1,NP
0197         CALL BWR(1,IWO,SBUF,1000)
0198         CALL BWR(1,IWO1,LSP,20)
0199         DO6 J=1,5
0200   6      TEMP(J)=0.
0201         DO8 L=1,20
0202         IF(LSP(L).EQ.0)GOTO12
0203         DO7 J=1,5
0204         MM=100*(J-1)
0205         DO7 M=1,5
0206         TEMP(J)=TEMP(J)+SBUF(5*(L-1)+M+MM)*DEPL(5*(LSP(L)-1)+M)
0207   7     CONTINUE
0208   8      CONTINUE
0209   12    IF(I.EQ.1)GOTO11
0210         IWO3(4)=NPISP
0211         IWO3(5)=0
0212         IWO3(6)=0
0213         IWO2(4)=NPK
0214         IWO2(5)=0
0215          IWO2(6)=0
0216         DO 30 K=1,I-1
0217         CALL BWR(1,IWO3,LSP,20)
0218         DO25 L=1,20
0219         IF(LSP(L).EQ.0)GOTO26
0220         IF(LSP(L).NE.I)GOTO25
0221         CALL BWR(1,IWO2,TBUF,1000)
0222         DO23 J=1,5
0223         DO23 M=1,5
0224         MM=100*(M-1)
0225         TEMP(J)=TEMP(J)+TBUF(5*(L-1)+J+MM)*DEPL(5*(K-1)+M)
0226   23    CONTINUE
0227         GOTO30
0228    25   CONTINUE
0229   26     CALL SWO(IWO2,IWO2,1000)
0230   30    CONTINUE
0231   11     WRITE(LU1,9)I,TEMP
0232   9      FORMAT(/" I"I4,5X"F:"5E14.5)
0233   10      CONTINUE
0234         GOTO2000
0235  C*****
0236   9998  STOP1602
0237  C*****
0238  9999   END
```

```
0239          END$
```

```
SFLF8  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002    C----DATE:  16/ 1/79
0003          PROGRAM FLF8
0004    C*****************************************************************
0005    C*                                                               *
0006    C*     PROGRAMME POUR OBTENIR LES FORCES NODALES NON EQUILIBREES  *
0007    C*     DANS LES ELEMENTS COUCHES EN ACIER.STOCKAGE DANS           *
0008    C*     LE VECTEUR "CHARG".                                        *
0009    C*                                                               *
0010    C*****************************************************************
0011          DIMENSION IP(5),BF(3,9),JBUF(54),DJ(3,3),AD(6,1),DF(3),AT(5,1)
0012         C,CR(3,1),FRES(3,5),B(3,6),BT(6,3),AE(6),DFO(3)
0013         C,CF(2),IWO5(6),NBUF(9),SBUF(4)
0014          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0015         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0016         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPS,MCAP(60),JCO,
0017         CNPE(3,350),JCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0018         CJCOOR(3,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0019         CNPT,NPK,NFISP,NFAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0020          EQUIVALENCE (LU1,IGO(4)),(I,IP(5)),(JCA,IP(2)),(ICA,IP(3)),
0021         C(JBUF,BF),(DJ,BF),(AD,BF),(DF,AXBUF),(AT,AXBUF(4)),(CR,AXBUF(9))
0022         C,(FRES,AXBUF(12)),(B,AXBUF(27)),(AREA,AXBUF(45)),(AE,AXBUF(46))
0023         C,(NBUF(2),SBUF),(CF,AXBUF(52)),(IWO5,AXBUF(54))
0024    C-----
0025    C-----
0026          CALL RMPAR(IP)
0027          GOTO(1,100),IP(4)+1
0028    C-----
0029    C-----INITIALISATION DES CONTROLES
0030     1    IWO(4)=NPDJ
0031          IWO1(4)=NPB
0032          IWO2(4)=NPAUX
0033          IWO3(4)=NPT
0034          IWO4(4)=NPT
0035          IWO5(4)=NPCC+1
0036          DO4 I=1,3
0037     4    IWO5(I)=IWO(I)
0038          DO2 I=5,6
0039          IWO(I)=0
0040          IWO1(I)=0
0041          IWO2(I)=0
0042          IWO3(I)=0
0043          IWO5(I)=0
0044     2    IWO4(I)=0
0045    C----
0046          TOLER=0.
0047          CALL BWR(1,IWO5,NBUF,9)
0048          IP(1)=NBUF(1)
0049          DO7 I=1,4
0050     7    AXBUF(56+I)=SBUF(I)
0051    C-----'DO' ELEMENTS
0052          I=0
0053    5     I=I+1
0054          DO3 K=1,3
0055          DO3 J=1,5
0056      3   FRES(K,J)=0.
0057          JCA=NCAP
0058          IF(I.GT.NE-NB)JCA=MCAP(I-NE+NB)
0059          CALL BWR(1,IWO1,JBUF,54)
0060          CALL MATB(NPE(1,I),NPE(2,I),NPE(3,I),JCOOR,B,AREA)
0061    C-----CALCUL DEFORMATIONS PLANES
0062          DO10 J=1,3
0063          AE(J)=0.
0064          DO6 K=1,3
0065          DO6 L=-1,0
0066    6      AE(J)=AE(J)+B(J,2*K+L)*CHARG(5*NPE(K,I)-3+L)
0067          DEF(J,I)=DEF(J,I)+AE(J)
0068          AE(J+3)=0.
0069          DO8 K=1,3
0070          DO8 L=-2,0
0071    8     AE(3+J)=AE(3+J)+BF(J,3*K+L)*CHARG(5*NPE(K,I)+L)
0072          DEF(3+J,I)=DEF(3+J,I)+AE(J+3)
0073    10    CONTINUE
0074    C-----'DO' COUCHES
0075          ICA=0
0076    20    ICA=ICA+1
0077          CALL BWR(1,IWO3,AT,10)
0078          CALL BWR(1,IWO,DJ,18)
```

```
SFLF9  T=00003 IS ON CR00040 USING 00021 BLKS R=0000

0001            FTN4
0002   C-----DATE: 16/ 1/79
0003          PROGRAM FLF9
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DES FORCES RESIDUELLES DANS LES *
0007   C*     ELEMENTS EN BETON.COUCHES FISSUREES.                      *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION AT(5,1),T(3,3),CR(3,1),D(2),TC(3,1),
0011         CCP(3),DF(3),IP(5)
0012          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0013         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0015         CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0016         CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0017         CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0018          EQUIVALENCE(I,IP(5)),(LU1,IGO(4))
0019         C,(ICA,IP(3)),(JCA,IP(2))
0020         C,(DF,AXBUF),(AT,AXBUF(4)),(CR,AXBUF(9))
0021   C-----
0022   C-----
0023          CALL RMPAR(IP)
0024   C----
0025          XTOLER=0.05
0026   C----
0027   C-----DIRECTIONNEMENT
0028          IR=0
0029          GOTO(70,35),IP(4)
0030   C----
0031   C------COUCHES FISSUREES.
0032   C----
0033   C&&&&
0034    35    WRITE(LU1,34)I,ICA
0035    34     FORMAT(/X"BETON FISSURE:"5X"I:"I5,3X"C:"I3)
0036    31    WRITE(LU1,32)DF,(AT(J,1),J=1,3)
0037    32    FORMAT(X"DEF:"3E15.5,/X"TENC:"3E15.5)
0038   C&&&&
0039   C-----OBTENTION DES CONTRAINTES CORRESPONDANTES AUX DEFORMATIONS
0040   C-----BETON FISSURE.ALFA=DIRECTION FISSURATION-1
0041    70    ALFA=AT(4,1)
0042          IF(ALFA.GT.900.)ALFA=ALFA-1000.
0043          IF(ALFA.GT.90.)ALFA=ALFA-180.
0044   C%%%%
0045   C%%%% IF(ICA.LE.NCAP)GOTO75
0046   C%%%% DF(2)=0.
0047   C%%%% DF(3)=0.
0048   C%%%% AT(2,1)=0.
0049   C%%%% AT(3,1)=0.
0050   C%%%% C2=0.
0051   C%%%% S2=1.
0052   C%%%% SC=0.
0053   C%%%% IF(AT(5,1).EQ.0.)GOTO76
0054   C%%%% S2=0.
0055   C%%%% C2=1.
0056   C%%%% GOTO76
0057   C%%%%
0058    75    ALFA=ALFA*3.141592/180.
0059          SC=SIN(ALFA)
0060          AUX=COS(ALFA)
0061          C2=AUX*AUX
0062          S2=SC*SC
0063          SC=SC*AUX
0064    76    D(2)=S2*DF(1)+C2*DF(2)-SC*DF(3)
0065          D(1)=-2.*SC*(DF(1)-DF(2))+DF(3)*(C2-S2)
0066          AUX=C2*DF(1)+S2*DF(2)+SC*DF(3)
0067   C****
0068   C---- UNE FISSURE S'EST FERMEE
0069          IF(AUX.LT.0.)WRITE(LU1,84)I,ICA,AUX,1
0070          IF((AT(4,1).GT.900.).AND.(D(2).LT.0.))WRITE(LU1,84)I,ICA,D(2),2
0071      84 FORMAT(//"  ATTENTION...FISSURE FERMEE!!!...ELEMENT"I5,
0072         CX"C:"I3,3X"AUX="E12.4,X"FISS."I2)
0073   C****
0074    85    CR(2,1)=0.
0075          CR(1,1)=0.
0076          CR(3,1)=0.
0077          CP(1)=AT(1,1)*C2+AT(2,1)*S2+AT(3,1)*2*SC
0078          CP(2)=AT(1,1)*S2+AT(2,1)*C2-AT(3,1)*2*SC
```

```
0079          CP(3)=-AT(1,1)*SC+AT(2,1)*SC+AT(3,1)*(C2-S2)
0080    C%%%%
0081    C%%%%  IF(ICA.LE.NCAP)GOTO86
0082    C%%%%  IF(AT(5,1).EQ.0.)GOTO88
0083    C%%%%  GOTO87
0084    C%%%%
0085     86    IF(AT(4,1).GT.900.)GOTO100
0086           IF(AUX.LT.0.004)CR(3,1)=0.15*EB*(1.-AUX/0.004)*D(1)
0087     87    IF(AUX.LT.FA/EA)CR(1,1)=AT(5,1)*(AUX-FA/EA)**2
0088           IF(CR(1,1).GT.0.64*FB**(2./3.))CR(1,1)=EB*AUX
0089     88    IF(D(2).LT.0.)GOTO 90
0090           CR(2,1)=D(2)*EB
0091           IF(CR(2,1).LT.0.64*FB**(2./3.))GOTO500
0092    C%%%%
0093    C%%%%  IF(ICA.LE.NCAP)GOTO89
0094    C%!!!
0095    C%!!!  ATTENTION,CELA EST SPECIFIQUE DU CAS ETUDIE DANS LA THESE
0096    C%%%%  IF((I.GT.327).AND.(I.LT.332))GOTO500
0097    C%!!!
0098    C%%%%  AUX=0.64*FB**(2./3.)
0099    C%%%%  AT(5,1)=AUX/(FA/EA-AUX/EB)**2
0100    C%%%%  CR(2,1)=0.
0101    C%%%%  IF(D(2).LT.FA/EA)CR(2,1)=AT(5,1)*(D(2)-FA/EA)**2
0102    C%%%%  GOTO500
0103    C%%%%
0104    C----  UNE DEUXIEME FISSURE S'EST OUVERTE
0105     89    AT(4,1)=AT(4,1)+1000.
0106           GOTO85
0107    90     AUX=-D(2)/0.00218
0108           IF(AUX.GT.1.)IR=1
0109           AUX0=FB/0.00218
0110    C****
0111            IF(EB/AUX0-2..LT.0.)STOP2503
0112    C****
0113           CR(2,1)=D(2)*EB/(1.+(EB/AUX0-2.)*AUX+AUX**2)
0114           GOTO 500
0115    C----  BETON FISSURE EN DEUX DIRECTIONS
0116     100   BUX=AT(5,1)
0117           DO401 III=1,2
0118           IF(AUX.LT.FA/EA)CR(III,1)=BUX*(AUX-FA/EA)**2
0119           IF(CR(III,1).GT.0.64*FB**(2./3.))CR(III,1)=EB*AUX
0120           AUX=D(2)
0121           BUX=0.64*FB**(2./3.)
0122           BUX=BUX/(FA/EA-BUX/EB)**2
0123     401   CONTINUE
0124    C-----OBTENTION CONTRAINTES RESIDUELLES
0125     500   T(1,1)=C2
0126           T(1,2)=S2
0127           T(1,3)=-2*SC
0128           T(2,1)=S2
0129           T(2,2)=C2
0130           T(2,3)=2*SC
0131           T(3,1)=SC
0132           T(3,2)=-SC
0133           T(3,3)=C2-S2
0134           CALL PMM(T,CR,3,3,1,TC)
0135           L=0
0136           DO520 J=1,3
0137           AUX=AMAX1(0.9,XTOLER*ABS(CR(J,1)))
0138           IF(ABS(CP(J)-CR(J,1)).LE.AUX)GOTO520
0139           TOLER=1
0140           L=1
0141    520    CONTINUE
0142           DO521 J=1,3
0143           CR(J,1)=AT(J,1)-TC(J,1)
0144     521   AT(J,1)=TC(J,1)
0145           IF(L.EQ.0)GOTO550
0146           WRITE(LU1,34)I,ICA
0147           WRITE(LU1,533)TC,CR,AT(5,1)
0148    533    FORMAT(X"TEF:"3E13.5,3X"TRES:"3E13.5,X"FIS:"E10.4)
0149     550   CONTINUE
0150    C&&&&
0151           IF(IR.NE.1)GOTO900
0152           WRITE(LU1,890)I,ICA
0153     890   FORMAT(//X"BETON FISSURE EN RUPTURE!!"3X"I,ICA:"2I5)
0154           WRITE(LU1,533)TC,CR,AT(5,1)
0155    C*****
0156           STOP 1746
0157    C*****
0158    C-----CHANGEMENT DE PROGRAMME
```

```
0159  900    INAM(2)=2HF8
0160         IP(4)=1
0161  400    CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4),IP(5))
0162         END
0163  C----
0164  C-----SUBROUTINE "PMM" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)=(C)
0165  C-----
0166         SUBROUTINE PMM(A,B,N1,N2,N3,C)
0167         DIMENSION A(N1,N2),B(N2,N3),C(N1,N3)
0168         DO 20 I=1,N1
0169         DO 20 K=1,N3
0170         Z=0.
0171         DO 10 L=1,N2
0172   10    Z=Z+A(I,L)*B(L,K)
0173   20    C(I,K)=Z
0174         END
0175         END$
```

```
SFL90  T=00003 IS ON CR00040 USING 00024 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002  C----DATE: 4/12/78
0003        PROGRAM FL90
0004  C*****************************************************************
0005  C*                                                               *
0006  C*     PROGRAMME POUR L,OBTENTION DES FORCES RESIDUELLES DANS LES *
0007  C*     ELEMENTS EN BETON.COUCHES NON FISSUREES.                  *
0008  C*                                                               *
0009  C*****************************************************************
0010        DIMENSION AT(5,1),T(3,3),CR(3,1),D(2),TC(3,1),ER(3),
0011       CDF(3),IP(5),BUF(6),CP(2)
0012        COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0013       CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,YU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014       CJC,IOFF,ITER,TOLER,HITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0015       CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0016       CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0017       CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0018        EQUIVALENCE(I,IP(5))
0019       C,(LU1,IGO(4)),(JCA,IP(2)),(ICA,IP(3))
0020       C,(DF,AXBUF),(AT,AXBUF(4)),(CR,AXBUF(9))
0021  C-----
0022  C-----
0023        CALL RMPAR(IP)
0024  C----
0025        XTOLER=0.05
0026        JPACO=0
0027        IR=0
0028  C-----
0029        DO 31 J=1,3
0030        BUF(J)=DF(J)
0031  31    BUF(J+3)=AT(J,1)
0032  C&&&&
0033  34    FORMAT(/X"I:"I5,3X"COUCHE:"I3)
0034  32    FORMAT(X"DEF:"3E15.5,/X"TENC:"3E15.5)
0035  C&&&&
0036  C-----OBTENTION DES CONTRAINTES CORRESPONDANTES AUX DEFORMATIONS
0037  C-----BETON NON FISSURE. "ALFA"=ORIENTATION DIRECTIONS PRINCIPALES
0038        IF(DF(1).EQ.DF(2))GOTO45
0039        ALFA=0.5*ATAN(DF(3)/(DF(1)-DF(2)))
0040        GOTO50
0041  45    ALFA=0.5*SIGN(3.141592/2.,DF(3))
0042        IF(DF(3).EQ.0.)ALFA=0.
0043  50    SC=SIN(ALFA)
0044        AUX=COS(ALFA)
0045        C2=AUX*AUX
0046        S2=SC*SC
0047        SC=SC*AUX
0048  C-----OBTENTION DES DEFORMATIONS PRINCIPALES
0049        D(1)=C2*DF(1)+S2*DF(2)+SC*DF(3)
0050        D(2)=S2*DF(1)+C2*DF(2)-SC*DF(3)
0051        CR(3,1)=0.
0052        K=0
0053  C---- D(1)<=D(2)...(VALEUR ARIMETIQUE)
0054        IF(D(1).LE.D(2))GOTO 111
0055        K=1
0056        J=-1
0057        IF(ALFA.LE.0.)J=1
0058        ALFA=ALFA+3.141592*J/2.
0059        AUX=S2
0060        S2=C2
0061        C2=AUX
0062        SC=-SC
0063        AUX=D(1)
0064        D(1)=D(2)
0065        D(2)=AUX
0066  111    AUX=-AT(1,1)*SC+AT(2,1)*SC+AT(3,1)*(C2-S2)
0067        IF(AT(1,1).EQ.AT(2,1))GOTO105
0068        ALFA0=0.5*ATAN(2.*AT(3,1)/(AT(1,1)-AT(2,1)))
0069        GOTO106
0070  105   ALFA0=0.5*SIGN(3.141592/2.,AT(3,1))
0071        IF(AT(3,1).EQ.0.)ALFA0=0.
0072  106   AX1=ALFA0*180./3.141592
0073        IF(K.EQ.1)AX1=AX1+90.*J
0074        AX2=ALFA*180./3.141592
0075        IF(ABS(AX1-AX2).GT.1.)WRITE(LU1,109)I,ICA,AX1,(AT(J,1),J=1,3)
0076       C,AUX,(DF(J),J=1,3),AX2
0077  109   FORMAT(/X"TXY*0:"3X"EL:"I5,X"C:"I3,4X"ALF0:"F10.4,2X"CON.(X,Y,"
0078       C"XY):",3(E11.5,3X)"C.P.XY:"E11.5,/X"DEF(X,Y,XY):"3(E11.5,3X),3X
```

```
0079          C"ALFA:"F10.4)
0080           CP(1)=AT(1,1)*C2+AT(2,1)*S2+AT(3,1)*2*SC
0081           CP(2)=AT(1,1)*S2+AT(2,1)*C2-AT(3,1)*2*SC
0082   C*****
0083            IF(CP(1).GT.CP(2))STOP2507
0084   C*****
0085           CP(1)=SQRT((AT(1,1)-AT(2,1))**2+4*AT(3,1)**2)/2.
0086           CP(2)=(AT(1,1)+AT(2,1))/2.+CP(1)
0087           CP(1)=CP(2)-2.*CP(1)
0088           IPACO=0
0089   C-----OBTENTION CONTRAINTES REELLES CORRESPONDANTES AUX
0090   C-----DEFORMATIONS CALCULEES
0091           IF((CP(2)/CP(1).GE.-0.50).AND.((D(1).NE.0.).OR.(D(2).NE.0.))
0092          C.AND.(CP(1).LT.0.))GOTO125
0093           ASSIGN 118 TO ILB
0094           VV=VU
0095           GOTO114
0096    112     ASSIGN 320 TO ILB
0097           VV=0.9*VU
0098    114    AUX=EB/(1.-VV*VV)
0099           CR(1,1)=AUX*(D(1)+VV*D(2))
0100           CR(2,1)=AUX*(D(2)+VV*D(1))
0101   C****
0102           IF(CR(1,1).GT.CR(2,1))STOP2510
0103   C****
0104           GOTO ILB
0105    118     IF((D(1).EQ.0.).AND.(D(2).EQ.0.))GOTO320
0106   C****
0107           IF((CR(1,1).EQ.0.).AND.(CR(2,1).EQ.0.))STOP2511
0108   C****
0109           A=CR(2,1)/CR(1,1)
0110           IF((CR(1,1).GE.0.).AND.(CR(2,1).GE.0.))GOTO112
0111           IF(A.GE.-0.50)GOTO125
0112   C---- DOMAINE COMPRESSION-TRACTION LINEAIRE
0113    119     AUX=VU*(0.9-0.05/A)
0114           IF(ABS(AUX-VV).LT.0.001)GOTO320
0115           ASSIGN 120 TO ILB
0116           VV=AUX
0117           GOTO114
0118    120     A=CR(2,1)/CR(1,1)
0119   C****
0120           IF(A.GE.-0.49)STOP2512
0121   C****
0122           GOTO119
0123   C----DOMAINE NON LINEAIRE
0124    125    CR(1,1)=CP(1)
0125           CR(2,1)=CP(2)
0126           AUX=0.01
0127           A0=CR(2,1)/CR(1,1)
0128           A9=A0
0129   C&&&&
0130           IF(I.NE.JPACO)GOTO161
0131    126    WRITE(LU1,160)I,ICA,A0
0132    160    FORMAT(2/,X"EL:"I4," C:"I3,5X"A:"10X"FF:"10X"C1(1):"10X"C1(2):"
0133          C10X"A1="F10.3)
0134    161    CONTINUE
0135   C&&&&
0136           M=0
0137           N1=0
0138           N2=0
0139   C****
0140           IF(D(1).GE.0.)STOP2513
0141   C****
0142           IF(D(2).NE.0.)GOTO165
0143           IZ=0
0144           A=0.2
0145           A9=A
0146           GOTO170
0147    165    IZ=1
0148           AX1=1.
0149           AX2=0.201
0150           IF(D(2).LT.0.)GOTO166
0151           IZ=2
0152           AX1=0.199
0153           AX2=-0.5
0154    166    A0=AMIN1(A0,AX1-0.9*AUX)
0155           A0=AMAX1(A0,AX2+0.9*AUX)
0156           DO 300 J=0,200
0157           DO 290 K=-1,1,2
0158           A=A0+K*J*AUX
```

```
0159          IF(K.EQ.-1)GOTO168
0160          IF(N1.EQ.1)GOTO280
0161          IF(A.LT.AX1)GOTO170
0162          N1=1
0163          A=AX1
0164          GOTO170
0165    168    IF(N2.EQ.1)GOTO280
0166          IF(A.GT.AX2)GOTO170
0167          N2=1
0168          A=AX2
0169    C****
0170          IF(J.EQ.0)STOP2514
0171    C****
0172    170   CALL ROT(-2.5,-2.5*A,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
0173          EBJ=EB/(1.-VU*A)
0174          DO 200 N=1,2
0175          AUX0=D(N)/ER(N)
0176    C****
0177          IF(AUX0.GE.0.)GOTO175
0178          WRITE(LU1,171)I,ICA,N,A,D,ER
0179    171   FORMAT(3I6,6E12.5)
0180          STOP2515
0181    C****
0182    175   IF((N.EQ.1).OR.(A.LT.0.199).OR.(A GT.0.201))GOTO172
0183          CR(2,1)=-10000.
0184          GOTO200
0185    172    IF(AUX0.LT.1.)GOTO198
0186    C****
0187          IF(M.EQ.2)STOP2517
0188    C****
0189          IF(IPACO.NE.1)GOTO173
0190          IF(N.EQ.1)GOTO305
0191          GOTO200
0192    173   IF(IZ.EQ.0)GOTO305
0193          IF(IZ.EQ.2)GOTO195
0194          IF((N.EQ.1).AND.(K.EQ.1))N1=1
0195          IF((N.EQ.1).OR.(K.EQ.1))GOTO280
0196          IF(A.GE.0.210)GOTO174
0197          A=A+AUX*0.1
0198          GOTO170
0199    174   N2=1
0200          GOTO280
0201    195    IF((N.EQ.1).AND.(K.EQ.-1))N2=1
0202           IF((N.EQ.2).AND.(K.EQ.-1).AND.(A.LE.0.))N2=1
0203           IF((N.EQ.1).OR.(K.EQ.-1).OR.(A.LE.0.))GOTO280
0204          IF(A.LE.0.190)GOTO196
0205          A=A-AUX*0.1
0206          GOTO170
0207    196   N1=1
0208          GOTO280
0209    198   CR(N,1)=EBJ*D(N)/(1.+(EBJ*ER(N)/SR1
0210         C-1.-GA)*AUX0+GA*AUX0**2)
0211          IF(IZ.EQ.0)GOTO311
0212          EBJ=EB/(A-VU)
0213    200   CONTINUE
0214          IF(IPACO.EQ.0)GOTO199
0215          CR(2,1)=CR(1,1)*A9
0216          GOTO500
0217    199   FFF=CR(1,1)-CR(2,1)
0218    C&&&&
0219          IF(I.NE.JPACO)GOTO207
0220    201   WRITE(LU1,206)A,FFF,CR(1,1),CR(2,1)
0221    206   FORMAT(11X,F10.5,3F16.3)
0222    207   CONTINUE
0223    C&&&&
0224          IF(M.NE.0)GOTO209
0225          CRA=CR(1,1)
0226          CRB=CR(2,1)
0227    209   IF(ABS(FFF).LE.0.01)GOTO310
0228          IF(M.NE.0)GOTO210
0229          M=1
0230          I0=1
0231          IF(FFF.LT.0.)I0=-1
0232          GOTO 280
0233    210   I1=1
0234          IF(FFF.LT.0.)I1=-1
0235          IF(I0.EQ.I1)GOTO270
0236          IF(CR(2,1).LT.-9999.)GOTO215
0237          IF(M.NE.2)GOTO220
0238          IF((A.LE.0.190).OR.(A.GE.0.210))GOTO310
```

```
0239    215   CR(2,1)=CR(1,1)
0240          GOTO310
0241    220   M=2
0242          A=A-K*AUX*0.9
0243          GOTO170
0244    270   IF(M.NE.2)GOTO280
0245          A=A+K*AUX*0.1
0246          GOTO170
0247    280   IF(J.EQ.0)GOTO 300
0248    290   CONTINUE
0249          IF(N1*N2.EQ.1)GOTO305
0250    300   CONTINUE
0251   C****
0252           STOP2516
0253   C*****
0254   C----ELEMENT EN RUPTURE
0255   305    IF(A9.LT.-1./15.)GOTO306
0256          IF((IPACO.EQ.1).OR.(A9.GE.0.2))GOTO304
0257           GOTO313
0258    304     IR=1
0259          GOTO521
0260   306     IF(A9.GT.-0.5)GOTO309
0261          WRITE(LU1,307)I,ICA,A9,ALFA,(AT(M,1),M=1,3),(DF(M),M=1,3)
0262          A9=-0.499999
0263   307    FORMAT(X"DISCONT.:"/X"EL:"I4" C:"I3,4X"A9:"E10.4,3X"ALFA:"E10.4,
0264         C/X"AT:"3E15.4,5X"DEF:"3E15.4)
0265    309    CALL ROT(-2.5,-2.5*A9,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
0266          IF((IPACO.EQ.1).OR.(A9.LE.-0.4999))GOTO312
0267    313   IPACO=1
0268          GOTO125
0269    312    AT(5,1)=SR1*A9/(FA/EA-ER(2))**2
0270          GOTO330
0271   310    CR(1,1)=0.5*(CR(1,1)+CR(2,1))
0272   311    CR(2,1)=A*CR(1,1)
0273          GOTO500
0274   C----RUPTURE DOMAINE LINEAIRE
0275    320   AUX=FB**(1./3.)
0276          IF(CR(1,1).LT.0.)AUX=(AUX*A-0.366157)/A
0277          AUX=FB*0.64/AUX
0278          IF(CR(2,1).LT.AUX)GOTO500
0279          AUX0=AUX*(1.-YY/A)/EB
0280          AT(5,1)=AUX/(FA/EA-AUX0)**2
0281   C-----FISSURATION DES ELEMENTS
0282   330    TK=ALFA*180./3.141592
0283          J=-1
0284          IF(TK.LE.0.)J=1
0285          TK=TK+90.*J
0286          IF(TK.LT.0.)TK=TK+180.
0287          AT(4,1)=TK
0288          IP(4)=2
0289           INAM(2)=2HF9
0290          GOTO900
0291   C-----ORTENTION CONTRAINTES RESIDUELLES
0292    500   T(1,1)=C2
0293          T(1,2)=S2
0294          T(1,3)=-2*SC
0295          T(2,1)=S2
0296          T(2,2)=C2
0297          T(2,3)=2*SC
0298          T(3,1)=SC
0299          T(3,2)=-SC
0300          T(3,3)=C2-S2
0301          M=0
0302   501    A=CR(2,1)/CR(1,1)
0303          AUX8=CR(1,1)
0304          AUX9=CR(2,1)
0305          AUX7=A
0306          CALL PMN(T,CR,3,3,1,TC)
0307          L=0
0308          AUX6=AMIN1(AUX8,AUX9)
0309          DO520 J=1,2
0310          AUX=AMAX1(0.9,XTOLER*ABS(AUX6))
0311           IF(ABS(CP(J)-AUX6).LE.AUX)GOTO525
0312          IF((M.EQ.1).OR.(A.GE.0.2).OR.(A.LE.-0.5))GOTO509
0313          M=1
0314          CR(1,1)=CRA
0315          CR(2,1)=CRA*A0
0316          WRITE(LU1,502)I,ICA,CRA,CRB
0317   502    FORMAT(/X"EL:"I5," C:"I3,5X"CRA,CRB:"2F10.1)
0318          GOTO501
```

```
 319   509    L=1
 320          IF((A.LT.0.18).OR.(A.GT.0.22))TOLER=1
 321    525    AUX6=AMAX1(AUX8,AUX9)
 322   520    CONTINUE
 323          DO526 J=1,3
 324           CR(J,1)=AT(J,1)-TC(J,1)
 325   526    AT(J,1)=TC(J,1)
 326   C&&&&
 327          IF((L.EQ.0).AND.(I.NE.JPACO))GOTO529
 328   524    BUX1=SQRT((BUF(4)-BUF(5))**2+4.*BUF(6)**2)/2.
 329          BUX2=(BUF(4)+BUF(5))/2.
 330          BUX2=BUX2+BUX1
 331          BUX1=BUX2-2*BUX1
 332          BUX3=BUX2/BUX1
 333    521    WRITE(LU1,34)I,ICA
 334          WRITE(LU1,32)BUF
 335          IF(IR.EQ.1)GOTO545
 336          WRITE(LU1,523)TC,CR,AUX8,AUX9,AUX7,BUX1,BUX2,BUX3
 337    523   FORMAT(X"TEF:"3E15.5,5X"TRES:"3E15.5,
 338         C/X"TPF:"2E15.5,2X"ALFA:"F9.3,4X,"TPC:"2E15.5,2X,"ALFA:"F9.3)
 339   529    CONTINUE
 340   C&&&&
 341   540    IF(IR.NE.1)GOTO549
 342   545    WRITE(LU1,546)I,ICA
 343   546    FORMAT(//X"BETON EN RUPTURE!!"5X"I,ICA:"2I5)
 344   C&&&&
 345          STOP 1746
 346   C&&&&
 347   549    IP(4)=1
 348   550    INAM(2)=2HF8
 349   900    CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3),IP(4),IP(5))
 350          END
 351   C----
 352   C----
 353   C-----SUBROUTINE "PMM" POUR OBTENIR LE PRODUIT MATRICIEL (A)*(B)=(C)
 354   C-----
 355          SUBROUTINE PMM(A,B,N1,N2,N3,C)
 356          DIMENSION A(N1,N2),B(N2,N3),C(N1,N3)
 357          DO 20 I=1,N1
 358          DO 20 K=1,N3
 359          Z=0.
 360          DO 10 L=1,N2
 361    10    Z=Z+A(I,L)*B(L,K)
 362    20    C(I,K)=Z
 363          END
 364   C-----
 365   C----
 366   C-----SUBROUTINE "ROT" POUR OBTENIR LES CONTRAINTES ET DEFORMATIONS
 367   C-----EN RUPTURE
 368   C----
 369          SUBROUTINE ROT(T1,T2,ER,SR1,FB,EB,GA,LU1)
 370          DIMENSION ER(3),D(13),E(3,13)
 371          DATA D/1.,.82,.64,.525,.2,.13,0.,-.052,-.07,-.103,-.204,-.35,-.5
 372         C/,E/-2.6,-2 6,3.39,-2.88,-1.96,3 12,-3.,-1.33,2.5,
 373         C-3.08,-0.76,1.96,-3 15,0.,1.64,-3.,0 53,1.33,
 374         C-2.18,0.8,0.8,-1.43,0.6,0 28,-1.23,0.49, 22,
 375         C-0.85,0.29,0.14,-0.46,0.19,0 052,-0 315,0.17,0 [illegible],
 376         C-0.18959,0.12065,0.017235/
 377          A=T2/T1
 378          VU=0.2
 379   C-----CONTROLE T1<=T2 ; T1(0; A>-0.5
 380   C****
 381          IF(T1.GT.T2)STOP31
 382   C****
 383          IF(A.LT.-0 50001)STOP33
 384   C****
 385          IF(T1.GE.0.)STOP34
 386   C****
 387   C----OBTENTION CONTRAINTE RUPTURE SR1
 388          AUX0=FB**(1./3.)
 389          IF(A.GT.-1 /15 )GOTO10
 390          SR1=0.64*FB/(A*AUX0-0.366157)
 391          GOTO20
 392    10    AUX=3.65
 393          IF(A.LT.0.)AUX=(15.*AUX0-43.05468)/(AUX0+5.49236)
 394          SR1=-(1.+AUX*A)*FB/(1.+A)**2
 395   C----OBTENTION DEFORMATIONS EN RUPTURE
 396   20     GA=AMAX1(0.,AMIN1(1.,1.+10.*A))
 397          RM=FRM(A)
 398          DO30 I=1,13
```

```
0399          IF(A.GT.D(I))GOTO40
0400   30     CONTINUE
0401          I=13
0402   40     IF(I.EQ.1)STOP36
0403   C****
0404          RM0=FRM(D(I-1))
0405          RM1=FRM(D(I))
0406          DO60 J=1,3
0407          ER(J)=E(J,I-1)+(E(J,I)-E(J,I-1))/(RM1-RM0)*(RM-RM0)
0408          ER(J)=ER(J)*1.E-03
0409   60     CONTINUE
0410          AUX=EB/(1.-VU*A)
0411          DO90 J=1,3
0412          AUX0=AUX*ER(J)/SR1-1.-GA
0413          IF(AUX0.GE.0.)GOTO80
0414          AUX2=ER(J)
0415          AUX0=AUX0+1.+GA
0416          ER(J)=(1.+GA)*SR1/AUX
0417   80     IF((J.EQ.1).AND.(A.EQ.VU))J=2
0418          IF(J.EQ.1)AUX=EB/(A-VU)
0419          IF(J.EQ.2)AUX=-EB/(VU*(1.+A))
0420   90     CONTINUE
0421          END
0422   C----
0423   C---- FONCTION FRM
0424   C----
0425          FUNCTION FRM(A)
0426          FRM=-1.
0427          IF(A.LT.0.)FRM=3.
0428          PI=3.141592
0429          B=A
0430          IF(A.EQ.0.)B=1.E-20
0431          FRM=(ATAN(1./B)+FRM*PI/4.)/PI*6.4
0432          END
0433          END$
```

```
SFL10  T=00003 IS ON CR00040 USING 00019 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C-----DATE: 16/12/78
0003          PROGRAM FL10
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LA VERIFICATION DE LA VALIDITE DE LA       *
0007   C*     SOLUTION OBTENUE A CHAQUE ITERATION.SORTIE DES RESULTATS. *
0008   C*     STOCKAGE DES RESULTATS DANS LE DISQUE.PASSAGE AU CAS SUIVANT. *
0009   C*                                                               *
0010   C*****************************************************************
0011          DIMENSION IP(5),TENS(5),CPR(2),IBUF(56),JFIL(3),SBUF(4,3,50)
0012         C,LBUF(8402),RBUF(5)
0013         C,TBUF(5)
0014          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0015         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0016         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0017         CNPE(3,350),ZCOOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0018         CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0019         CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0020          EQUIVALENCE(LU1,IGO(4)),(LBUF(3),SBUF),(LBUF(2),RBUF)
0021          DATA JFIL/2HRE,2HSU,2HLT/
0022   C-----NOMBRE SECTEURS JFIL:66*NC
0023   C-----
0024          CALL RMPAR(IP)
0025   C-----SORTIE DES FORCES NODALES NON EQUILIBREES.
0026          IF((NITER.EQ.10000).OR.(MOD(ITER-1,NITER).NE.0))GOTO170
0027          WRITE(LU1,110)JCO,ITER,0.05,0.01,0.05
0028    110   FORMAT(4/,X"CAS CHARG.:"I4,5X"ITER.:"I5,5X
0029         C"TOL.CONTR.(%)="F5.2,2X,"(ACIER(%)="F5.2")",2X"(BET.FISS."
0030         C"(%)="F6.3")",2/
0031         C" NOEUD"4X"F.RES.X(KG.)"4X"F.RES.Y(KG.)"4X"F.RES.Z(KG.)"3X
0032         C"M.RES.TX(K.CM)"2X"M.RES.TY(K.CM)")
0033    140   DO 160 I=1,NP
0034          WRITE(LU1,155)I,(CHARG(5*I+J),J=-4,0)
0035    155   FORMAT(I6,5(F11.4,5X))
0036    160   CONTINUE
0037    170   IF(TOLER.EQ.0.)GOTO200
0038          IF(ITER.GT.2)GOTO200
0039   C-----CONTRAINTES NON EQUILIBREES NON NEGLIGEABLES.NOUV.ITER.
0040          ITER=ITER+1
0041          INAM(2)=2HF6
0042          TOLER=0.
0043          GOTO1040
0044   C----
0045   C-----SORTIE DES CONTRAINTES
0046   C----
0047    200   WRITE(LU1,210)2HEL,2HEM,2HEN,2HTS,2H  ,2H
0048    210   FORMAT(3/,X,6A2,23X"(KG/CM2)",2/,4X"I(C)"10X"SX"6X"SY"5X"TXY"5X
0049         C"S-I"5X"S-II"2X"ALFA(DEG) ALFA FIS."5X"EPS-X"7X,
0050         C"EPS-Y"6X"GAM-XY",/79X"PSI-XX"6X"PSI-YY"5X"PSI-XY")
0051          IWO(4)=NPT
0052          IWO(5)=0
0053          IWO(6)=0
0054          L=0
0055          DO290 J=1,NE
0056          NN=0
0057          JCA=NCAP
0058          IF(J.GT.NE-NB)JCA=MCAP(J-NE+NB)
0059          DO290 ICA=1,JCA
0060          K=2HBE
0061          IF(ICA.LE.2)K=2HAC
0062          CALL BWR(1,IWO,TENS,10)
0063          IF(TENS(5).NE.0.)K=2HF1
0064          IF(TENS(4).GT.900.)K=2HF2
0065          CALL CPRIN(TENS(1),TENS(2),TENS(3),CPR(1),CPR(2),AUX)
0066          AUX=AUX*180./3.141592
0067          AUXO=1.E+20
0068          IF(TENS(5).EQ.0.)GOTO239
0069          AUXO=TENS(4)
0070          IF(AUXO.GT.900.)AUXO=AUXO-1000.
0071          IF(AUXO.GT.90.)AUXO=AUXO-180.
0072   239    CALL CODE
0073          WRITE(IBUF,240)J,ICA,K,(TENS(M),M=1,3),CPR,AUX,AUXO,(DEF(N,J)
0074         C,N=NN+1,NN+3)
0075    240   FORMAT(I4,"("I1")-("A2")"6F8.1,8X,F8.1,3E12.4)
0076          IF(ICA.LE.2)GOTO246
0077          DO 245 K=39,56
0078   245    IBUF(K)=2H
```

```
0079   246    WRITE(LU1,247)IBUF
0080   247    FORMAT(56A2)
0081          NN=3
0082    290   CONTINUE
0083   C-----
0084          IWO(4)=NPT
0085          IWO(5)=0
0086          IWO(6)=0
0087   C-----STOCKAGE CONTRAINTES DES COUCHES:3,(3+NCAP)/2,NCAP
0088          LBUF(1)=JCO
0089          K=(3+NCAP)/2
0090          DO400 I=1,NE
0091          JCA=NCAP
0092          IF(I.GT.NE-NB)JCA=NCAP(I-NE+NB)
0093          J=0
0094          DO400 ICA=1,JCA
0095          IF((ICA.NE.3).AND.(ICA.NE.K).AND.(ICA.NE.NCAP))GOTO390
0096          CALL BWR(1,IWO,TBUF,10)
0097          J=J+1
0098   C****
0099          IF(J.GT.3)STOP3776
0100   C****
0101          DO350 L=1,4
0102    350   SBUF(L,J,I)=TBUF(L)
0103          GOTO400
0104   390    CALL SWO(IWO,IWO,10)
0105   400    CONTINUE
0106          J=66*(JC-1)
0107          CALL EXEC(15,102B,LBUF,8402,JFIL,J)
0108   C-----NOUVEAU CAS DE CHARGEMENT
0109          JC=JC+1
0110          JCO=JCO+1
0111          ITER=1
0112          IF(JC.GT.NC)GOTO 1050
0113          IWO(4)=NPCC
0114          IWO(5)=0
0115          IWO(6)=0
0116          CALL SWO(IWO,IWO,IOFF)
0117          DO 1000 I=1,NP+1
0118          CALL BWR(1,IWO,LBUF,11)
0119          IOFF=IOFF+11
0120          IF(LBUF(1).EQ.0)GOTO1010
0121          J=LBUF(1)
0122          DO550 K=-4,0
0123    550   CHARG(5*J+K)=CHARG(5*J+K)+RBUF(5+K)
0124   1000   CONTINUE
0125   C-----RETOUR AU PROGRAMME ELF3
0126   1010   INAM(2)=2HF4
0127   1040   CALL EXEC(10,INAM,IP(1),IP(2),IP(3))
0128          GOTO9999
0129   C-----C,ETAIT LE DERNIER CAS DE CHARGEMENT
0130   C****
0131   1050   IF(IGO(1).GE.0)STOP3777
0132   C****
0133          GOTO 1010
0134   9999   END
0135   C-----SUBROUTINE "CPRIN" POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES PRINCIPALES
0136          SUBROUTINE CPRIN(TX,TY,TXY,T1,T2,ALFA)
0137          T1=0.
0138          T2=0.
0139          ALFA=0.
0140          IF(TX.EQ.TY)GOTO5
0141          ALFA=0.5*ATAN(2.*TXY/(TX-TY))
0142          GOTO 10
0143   5      ALFA=0.5*3.141592/2.
0144          IF(TXY.EQ.0.)ALFA=0.
0145          IF(TXY.LT.0.)ALFA=-ALFA
0146    10    SC=COS(ALFA)
0147          T1=SIN(ALFA)
0148          C2=SC*SC
0149          S2=T1*T1
0150          SC=SC*T1
0151          T1=C2*TX+S2*TY+2*SC*TXY
0152          T2=S2*TX+C2*TY-2*SC*TXY
0153          END
0154          END$
```

```
SFL11  T=00003 IS ON CR00040 USING 00016 BLKS R=0000

0001          FTN4
0002   C-----DATE: 22/2/79
0003          PROGRAM FL11
0004   C*****************************************************************
0005   C*                                                               *
0006   C*     PROGRAMME POUR LE TRACE DES COURBES DE CONTRAINTES        *
0007   C*     PRINCIPALES.                                              *
0008   C*                                                               *
0009   C*****************************************************************
0010          DIMENSION LBUF(8402),SBUF(4,3,350)
0011         C,IP(5),JFIL(3),X(350),Y(350),CPR(2)
0012          COMMON IGO(5),IWO(6),IWO1(6),IWO2(6),IWO3(6),IWO4(6),
0013         CINAM(3),IFIL(3),NE,NP,NR,NB,NC,EB,EA,VU,FB,FA,DA,TO,ESP,
0014         CJC,IOFF,ITER,TOLER,NITER,NCAP,NCAPB,MCAP(60),JCO,
0015         CNPE(3,350),2COOR(20),EPZ(20),DEF(6,350),AXBUF(60),
0016         CJCOOR(2,200),CHARG(1000),FPRT(10),ILM(2,60),
0017         CNPT,NPK,NPISP,NPAUX,NPKP,NPB,NPDJ,NPCC
0018          EQUIVALENCE(IGO(3),LU),(LBUF(3),SBUF)
0019         C,(X,CHARG),(Y,CHARG(501))
0020          DATA JFIL/2HRE,2HSU,2HLT/
0021   C-----
0022          CALL RMPAR(IP)
0023   C-----
0024   C-----
0025   C-----LECTURE CONTRAINTES DU FICHIER 'JFIL'
0026   C----
0027   C----
0028    5     PAUSE 33
0029          READ(1,*)NNC
0030          IF(NNC.EQ.0)GOTO2000
0031          J=66*(NNC-1)
0032          CALL EXEC(14,102B,LBUF,8402,JFIL,J)
0033          JCO=LBUF(1)
0034   C-----LECTURE DONNEES
0035   20      READ(1,*)ESC,XL,YL
0036   C----
0037          CALL PLTLU(10)
0038   C-----
0039   C-----TRACE VECTEURS DES CONTRAINTES PRINCIPALES DANS LE BETON
0040          DO15 I=1,NE
0041          X(I)=0.
0042          Y(I)=0.
0043          DO14 J=1,3
0044          K=NPE(J,I)
0045          X(I)=X(I)+JCOOR(1,K)/3.
0046          Y(I)=Y(I)+JCOOR(2,K)/3.
0047    14    CONTINUE
0048    15    CONTINUE
0049   35     X1=1.E+30
0050          Y1=1.E+30
0051          Y2=-1.E+30
0052          X2=-1.E+30
0053          DO40 I=1,NE
0054          X1=AMIN1(X1,X(I))
0055          Y1=AMIN1(Y1,Y(I))
0056          Y2=AMAX1(Y2,Y(I))
0057          X2=AMAX1(X2,X(I))
0058    40    CONTINUE
0059          X1=AMIN1(X1,0.)
0060          Y1=AMIN1(Y1,0.)
0061          X2=(X2-X1)/XL
0062          Y2=(Y2-Y1)/YL
0063   C****
0064          IF(ABS(X1)+ABS(Y1).GT.0.1)STOP7770
0065   C****
0066          Y1=(30.-YL)/2.
0067          CALL PLOT(0.,Y1,-3)
0068          DO 1000 ICA=1,3
0069          PAUSE 44
0070          DO 500 I=1,NE
0071          CALL CPRIN(SBUF(1,ICA,I),SBUF(2,ICA,I),SBUF(3,ICA,I),CPR(1),
0072         CCPR(2),ALFA)
0073          IF(ICA.NE.1)GOTO45
0074          X(I)=X(I)/X2
0075          Y(I)=Y(I)/Y2
0076    45    DO 480 K=1,2
0077          CALL FLECH(CPR(K),ALFA+3.141592/2.*(K-1),X(I),Y(I),ESC)
0078    480   CONTINUE
```

```
0079   500   CONTINUE
0080         PAUSE 55
0081   C----  ELEMENTS FISSURES
0082         DO600 I=1,NE
0083         IF(SBUF(4,ICA,I).EQ.0.)GOTO600
0084         AUX0=SBUF(4,ICA,I)
0085         IF(AUX0.GT.900.)AUX0=AUX0-1000.
0086         AUX0=AUX0*3.141592/180.
0087         AUX0=AUX0+3.141592/2.
0088         CCC=0.5*COS(AUX0)
0089         SSS=0.5*SIN(AUX0)
0090         CALL PLOT(X(I)-CCC,Y(I)-SSS,3)
0091         CALL PLOT(X(I)+CCC,Y(I)+SSS,2)
0092         IF(SBUF(4,ICA,I).LE.900.)GOTO600
0093         CALL PLOT(X(I)+SSS,Y(I)-CCC,3)
0094         CALL PLOT(X(I)-SSS,Y(I)+CCC,2)
0095   600   CONTINUE
0096         CALL PLOT(0.,0.,3)
0097   1000  CONTINUE
0098         GOTO5
0099   C****
0100   2000  STOP7777
0101   C****
0102         END
0103   C-----SUBROUTINE "CPRIN" POUR LE CALCUL DES CONTRAINTES PRINCIPALES
0104         SUBROUTINE CPRIN(TX,TY,TXY,T1,T2,ALFA)
0105         T1=0.
0106         T2=0.
0107         ALFA=0.
0108         IF(TX.EQ.TY)GOTO5
0109         ALFA=0.5*ATAN(2.*TXY/(TX-TY))
0110         GOTO 10
0111   5     ALFA=0.5*3.141592/2.
0112         IF(TXY.EQ.0.)ALFA=0.
0113         IF(TXY.LT.0.)ALFA=-ALFA
0114   10    SC=COS(ALFA)
0115         T1=SIN(ALFA)
0116         C2=SC*SC
0117         S2=T1*T1
0118         SC=SC*T1
0119         T1=C2*TX+S2*TY+2*SC*TXY
0120         T2=S2*TX+C2*TY-2*SC*TXY
0121         END
0122   C-----SUBROUTINE "FLECH" POUR LE TRACE DES VECTEURS
0123         SUBROUTINE FLECH(TENS,ALF,X,Y,ESC)
0124         ALFA=ALF
0125         BUX=ABS(TENS*ESC)/2.
0126         DO200 II=1,2
0127         AUX=BUX
0128         CALL PLOT(X,Y,3)
0129         X0=X+AUX*COS(ALFA)
0130         Y0=Y+AUX*SIN(ALFA)
0131         AUX=AUX/5.
0132         J=1
0133         IF(TENS.LT.0.)J=-1
0134         DO 100 I=-1,1,2
0135         X1=X0-AUX*COS(ALFA+I*3.141592/6.)*J
0136         Y1=Y0-AUX*SIN(ALFA+I*3.141592/6.)*J
0137         CALL PLOT(X0,Y0,2)
0138         CALL PLOT(X1,Y1,2)
0139   100   CONTINUE
0140         ALFA=ALFA+3.141592
0141   200   CONTINUE
0142         END
0143         END$
```