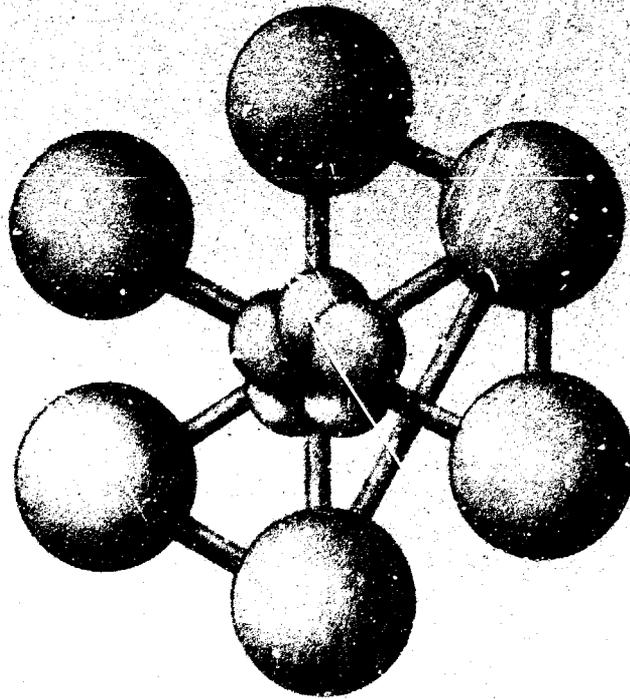


2011.01.18.10

FR 760 2916

# Calcul Et Analyse des Structures En Mecanique et Thermique



**TEDEL**

Etayé par des essais de mécanique des Structures, ce Système déjà qualifié pour de nombreuses applications, se développe grâce à de multiples collaborateurs et clients. A divers titres, nous remercions ici :

**BUREAU VERITAS, COMPAGNIE INTERNATIONALE DE SERVICE EN INFORMATIQUE, CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS, CONSTRUCTIONS METALLIQUES DE PROVENCE, CIRNA, ELECTRICITE DE FRANCE, SOCIETE NATIONALE DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS, TECHNICATOME.**

qui participent ou ont participé aux développements de ce Système.

**DEPARTEMENT DES ETUDES MECANIKES ET THERMIQUES**

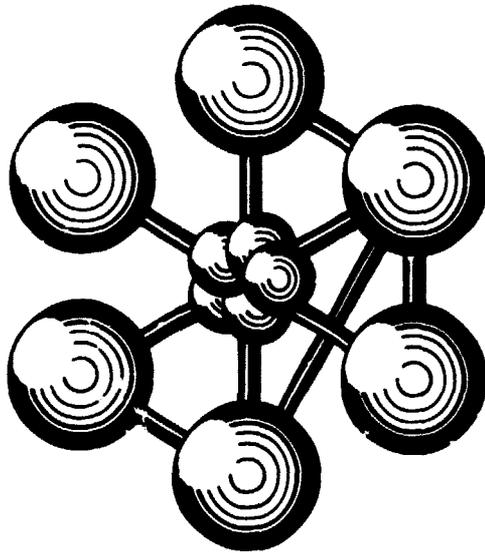
Division d'Etude et de Développement des Réacteurs

Commissariat à l'Énergie Atomique

**C.E.N. - SACLAY**

Tél. : 941.80.00

B.P. N° 2 - 91190 Gif-sur-Yvette



EMT/76-12

SYSTEME CEA SEMT

Programme TEDEL

Tuyauteries- Charpentes à 3 dimensions

Elastique- Plastique- Dynamique-Statique

Flambage- Thermoplasticité- Fluage- Grands déplacements

Notice d'utilisation- Mars 1976

par

A.HOFFMANN -Françoise JEANPIERRE

CEA  
1890

MARS 1976

PLAN	Pages
INTRODUCTION	1
A - DESCRIPTION GENERALE	3
I.A - Les éléments	-
II.A - Conditions aux limites	5
III.A - Résultats	6
B - NOTICE D'UTILISATION	7
I - Directive GEOMETRIE	9
Options QUELCONQUE	-
POUTRE	10
TUYAU	12
RELATIONS	17
PERMUT	19
II - Directive ARTICULER	20
III - Directive MATERIAU	22
IV - Directive CHARGE	23
Options POIDS	-
FORCES	-
ROTATIONS	24
REPARTIES	24
THERMIQUE	25
ACCELERATION	26
COMBINE	27
V - Directive IMPRIM	28
VI - Directive APPUI	29
VII - Directive MASSE	31

VIII - Directive DEPLACEMENT	33
IX - Directive SYMETRIE	34
X - Directive VARIABLE	35
XI - Directive SOMME	36
XII - Directive VERIFICATION	37
XIII - Directives NOCONT-NOIMPRIM	42
XIV - Directives CALCUL - SUITE, FIN	-
XV - Directive VIBRATION	43
XVI - Directives MODE - TRACER	45
XVII - Directive DYNAMIQUE - Recombinaison de modes propres.	46
XVIII - SORTIE DES RESULTATS	51
XIX - ORDRE DES DIRECTIVES	53
XX - REPONSE DYNAMIQUE PAS A PAS REGIME PLASTIQUE	54
XXI - CALCUL DES CHARGES CRITIQUES DE FLAMBAGE - Effet des tensions sur le calcul des fréquences propres	58
XXII - SAUVETAGE DES MATRICES DE RIGIDITE REPRISES	60
XXIII - CHARGES COMPLEXES EN DYNAMIQUE PAS A PAS	65

XXIV - GESTION DE LA MEMOIRE	67
XXV - LIMITATIONS - CARACTERISTIQUES INFORMATIQUES	69
XXVI - PLASTICITE - modèle	73
- méthode de calcul	
- forme des données	
- exemples	
- écrouissage cinématique	
- thermoplasticité	
- fluage	
XXVII - ELEMENTS DE COQUE	89
XXVIII - GRANDS DEPLACEMENTS	90
EXEMPLES	

## INTRODUCTION

L'objet du programme TEDEL est le calcul élastique ou plastique des tuyauteries et charpentes à 3 dimensions.

Les structures sont décrites à l'aide d'assemblages d'éléments de poutre, ou d'éléments plus sophistiqués dans le cas des tuyauteries tels que tuyaux courbes, coudes à 90°, tés, ou même d'éléments quelconques dont les caractéristiques de rigidité sont fournies à TEDEL.

TEDEL permet également le calcul dynamique des structures :

- recherche des fréquences et modes propres de vibration
- réponse au cours du temps à une sollicitation quelconque variant au cours du temps. Cette réponse peut être obtenue de deux façons
  - soit par recombinaison d'un certain nombre de modes propres
  - soit par intégration numérique directe de l'équation de la dynamique.

Dans ces deux derniers cas TEDEL tient compte d'amortissements éventuels.

Une option de TEDEL permet de calculer les charges critiques de flambage (Euler).

Les structures peuvent être de formes quelconques composées éventuellement d'un nombre quelconque de matériaux.

Un effort particulier a été apporté à l'entrée des données (elles sont lues sans format). Les données sont réparties en directives facultatives ayant un sens physique précis et correspondant à un ordre pour le programme. Par exemple : GEOMETRIE, MATERIAU, CHARGE, CALCUL, FIN.... Les exemples fournis en annexe illustrent la manière de présenter les données.

Enfin une gestion dynamique de la mémoire permet d'adapter la taille du programme à celle du problème traité. Si la mémoire de l'unité centrale est insuffisante, l'utilisateur peut passer en mémoire lente (disque) à l'aide de la directive DISQUE. Le programme, à l'aide de la taille de mémoire centrale définie par l'utilisateur, partitionne de lui-même les différentes matrices (rigidité, masse, flambage).

Les résultats sont imprimés sur listing et peuvent être écrits sur bande magnétique si l'utilisateur le désire. Dans le cas des tuyauteries, le programme dispose d'une option de vérification automatique du niveau de contrainte par rapport aux limites recommandées par l'ASME.

Les données géométriques, position des noeuds, numérotation des éléments sont en général fournies par le programme COCO [Réf. 1], qui tracera également des vues en perspective de la structure à étudier.

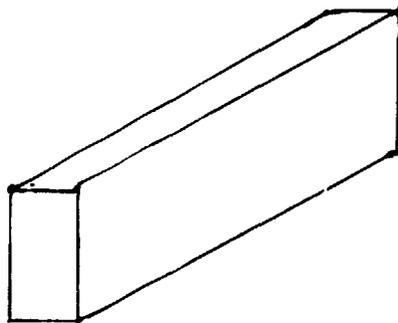
Les résultats mis sur bande magnétique peuvent être traités par les modules ESPACE - VISU - TEMPS [Réf. 5].

## A - DESCRIPTION GENERALE

### 1-A- Les éléments

Les éléments sont à deux noeuds (sauf peut être des éléments dits quelconques) dont les inconnues sont au nombre de six : les trois déplacements et les trois rotations.

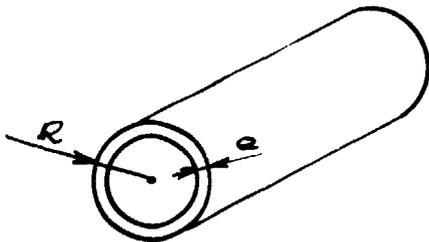
#### 1) Élément de poutre



L'élément est caractérisé par ses deux noeuds

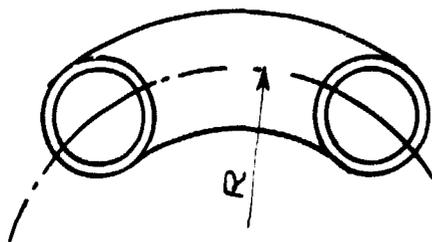
- la section droite
- 3 moments d'inertie ( $I_1, I_2, J$ )
- le module d'Young, le module transversal ( $G$ ), le coefficient de dilatation thermique.

#### 2) Élément droit de tuyauterie



C'est en fait une poutre, mais le programme calcule lui-même la section droite et les moments d'inertie à l'aide du rayon extérieur et de l'épaisseur.

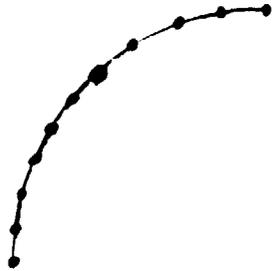
#### 3) Éléments courbes



Le rayon de courbure  $R$  est une donnée supplémentaire par rapport à l'élément droit. Ce qui caractérise essentiellement l'élément courbe, ce sont des facteurs de flexibilité et de majoration de contrainte.

Ces facteurs sont calculés automatiquement par le programme [Voir Option TUYAU].

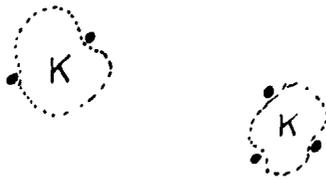
L'élément courbe ne constitue pas un seul élément pour TEDEL. Il doit être subdivisé au moment du maillage



en un certain nombre de petits éléments droits constituant le coude. Les points intermédiaires figurant explicitement comme inconnues, TEDEL réalise en sorte une intégration numérique le long de la ligne neutre, par rapport à l'intégration analytique exacte telle qu'elle peut se faire pour ce type de coude. Un petit nombre d'éléments

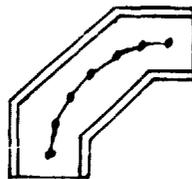
(5 à 10) à l'intérieur du coude suffit à assurer une très bonne précision (voir figures 1 et 2). Cette méthode, en dépit de son apparente lourdeur - plusieurs noeuds au lieu de deux -, offre des avantages évidents dans le cas des problèmes dynamiques (en général plus dangereux que les chargements statiques) et dans le cas des chargements complexes (poids, accélérations, charges thermiques, ...).

#### 4) Élément quelconque



C'est un élément à 2 ou 3 noeuds dont TEDEL est incapable de calculer quoi que ce soit. En particulier la matrice de rigidité doit être fournie par l'utilisateur au programme.

#### 5) Coude à 90°

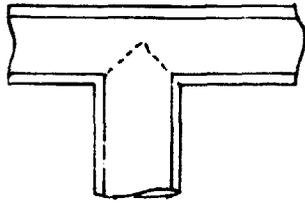


C'est en fait un coude répertorié dans les éléments de tuyauterie de classe II par l'ASME.

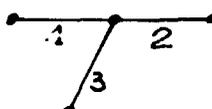
Le coude est calculé comme un coude rond par décomposition en petits éléments droits ;

les coefficients de flexibilité et de majoration de contrainte sont naturellement différents de ceux des tuyaux courbes (voir options TUYAU - VERIFIER pour plus de précision).

6) Té non renforcé



Le coefficient de flexibilité est égal à 1. Aussi il est représenté simplement par 3 éléments



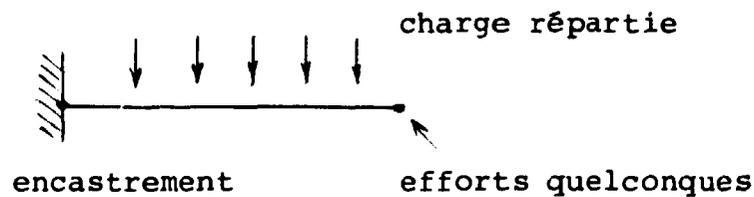
constituant

The diagram shows a central node from which three lines radiate outwards, labeled 1, 2, and 3. Line 1 is horizontal to the left, line 2 is horizontal to the right, and line 3 is diagonal downwards and to the left.

le té. Les coefficients de majoration de contrainte correspondant au Té sont appliqués aux 3 éléments le constituant. (Voir Options TUYAU et VERIFIER).

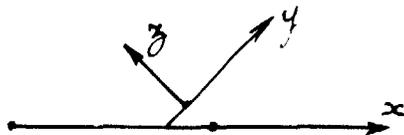
Remarques générales concernant l'élément de poutre

a) En statique l'élément de poutre utilisé est un élément exact, en ce sens que 1 seul élément donne la solution exacte concernant les déplacements et moments aux extrémités, pour le problème suivant.



Il n'en est pas de même en dynamique ou même pour l'étude du flambage, où l'on sait par exemple, que les modes de vibration des poutres sont des fonctions de type sinus, donc différentes des solutions statiques (polynômes du 3<sup>e</sup> ou 4<sup>e</sup> degré). Aussi un maillage plus soigné est-il nécessaire.

b) A chaque élément à deux noeuds, on associe un système local dans lequel ses propriétés sont décrites. L'utilisateur précisera ou non ce système.



II-A- Conditions aux limites

Les conditions de charges sont très générales.

On peut avoir toute combinaison des cas suivants : directive  
CHARGE

- forces concentrées (ou moments)
- poids
- forces réparties
- forces de rotation
- forces d'accélération
- charges thermiques : température ou même courbure initiale par élément.

Le nombre de cas de charge est quelconque.

Les conditions de déplacement peuvent être :

- déplacements imposés (déplacements ou rotations) (blocages, encastrements) (directive DEPLACEMENT)
- conditions de symétrie (directive SYMETRIE)
- relations linéaires entre déplacements du type :  
 $u_I = \alpha u_J + \beta u_K$  (directive RELATION)
- conditions de rotule à la jonction d'éléments (directive ARTICULER).

Enfin certaines conditions aux limites se présentent sous la forme d'une relation entre la force et le déplacement : cas des appuis élastiques. Cela revient en fait à ajouter des rigidités supplémentaires au système ; c'est l'objet de la directive APPUI.

### III-A- Résultats

Les résultats apparaissent sur listing, et à la demande de l'utilisateur seront écrits sur un fichier, qui pourra ensuite être exploité (extraction de résultats partiels, tracés de courbes) par les modules ESPACE-VISU-TEMPS.

## B - NOTICE D'UTILISATION

Cette notice est valable pour la version IBM 360-91 en usage à Saclay.

Seules les 4 premières lettres des mots sont nécessaires ; toutes les données sont lues sans format. Seules les options ou directives utiles sont nécessaires à introduire.

### Systèmes d'unités

L'utilisateur doit entrer ses données (coordonnées, forces, module d'Young, pressions, etc...) dans un système cohérent.

Par exemple pour les problèmes statiques

- coordonnées en mm
- module d'Young en Kgf/mm<sup>2</sup>
- pressior Kgf/mm<sup>2</sup>
- forces : Kgf
- les contraintes seront calculées en Kgf/mm<sup>2</sup>.

Pour les directives utilisant la directive Masse (Options :Vibration ou Rotation) l'utilisateur aura soin de définir la masse spécifique comme il convient : il faut que le terme  $\rho \times V \times \omega^2 \times r$  soit exprimé à l'aide des mêmes unités que les forces ( masse spécifique, V volume, pulsation, r coordonnée). Par exemple on pourra prendre les unités usuelles citées ci-dessus pour le cas statique et prendre la masse spécifique en g/cm<sup>3</sup> divisée par 9.81.10<sup>9</sup> (facteur g).

### Présentation des données

Le premier cas commence par une carte titre (72 caractères) suivie des données suivantes qui déterminent la taille du problème.

NTMAX	nombre d'éléments
NGMAX*	taille de la matrice de rigidité lorsqu'on travaille en mémoire rapide ou taille de la mémoire de travail lorsque l'utilisateur choisit d'effectuer la résolution en mémoire lente (disques). La taille de la matrice est imprimée par le programme. On mettra NGMAX = 0 si l'on utilise l'option DYNAMIQUE
NPOINT	nombre de noeuds
NCHAR = 0	les cas de charges ont tous les mêmes conditions de déplacement.
NFREQ	nombre de fréquences
= 0 :	si l'on n'utilise pas l'option VIBRATION Si l'on désire travailler en mémoire lente* on mettra le mot DISQUE suivi de NDISQUE indiquant le numéro logique du disque (exemples).

\* Voir § gestion de la mémoire.

## I - Directive GEOMETRIE

1) Mot clé GEOMETRIE

2) Mot option LINEAIRE NZONE nombre de tronçons rectilignes  
NRON nombre de points sur le tronçon  
(extrémités comprises) :  
NZONE }  $X_A Y_A Z_A$  coordonnées de l'origine du  
fois } tronçon  
 $X_B Y_B Z_B$  coordonnées de l'extrémité du  
tronçon

3) Mot option QUELCONQUE puis IBAND

Cette option ne peut être utilisée en même temps que l'option LINEAIRE.

La géométrie est lue sur le fichier de numéro logique IBAND (5 pour les cartes perforées).

Le fichier doit être constitué de la manière suivante :

Carte titre (72 caractères)

((X(J,I), J = 1,3), I = 1, NPOINT) format (6E12.5)

pour les coordonnées

((JOJO(J,I), J = 1,3), I = 1, NTMAX) format (18I4)

pour la numérotation des éléments

Le programme de maillage COCO par l'option PERFO constitue ce fichier. En particulier pour les éléments à deux noeuds, le deuxième et le troisième numéro des éléments doivent être identiques. Immédiatement après lecture des numéros de noeuds par élément, le programme les renumérote de façon que le premier noeud d'un élément soit de rang plus petit que le second noeud : si l'élément 130 a comme numéros de noeuds 29,12, le programme dira que l'élément 130 a comme noeuds 12 et 29.

4) Mot option POUTRE : voir exemple 1

Mot option REVOLUTION : les poutres sont de révolution

ou NON : les poutres ne sont pas de révolution.

Deux cas se présentent suivant que les poutres sont ou non de révolution.

a) poutre de révolution

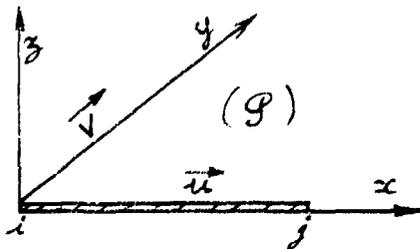
Autant de fois qu'on le désire

- I1\* : numéro du premier élément de la zone
- I2 : numéro du dernier élément de la zone
- De I1 à I2 compris les poutres auront les mêmes propriétés géométriques
- SD : section droite
- I : moment d'inertie (flexion)
- J : moment d'inertie (torsion)

Dans ce cas le programme détermine lui-même un système local pour la poutre.

Autant de fois qu'on le désire

- I1\*
- I2
- SD : section droite
- $I_{yy}$  : moment d'inertie
- $I_{zz}$  : moment d'inertie
- J : moment d'inertie : torsion
- V1, V2, V3, composantes du vecteur V définissant le système local de la poutre.



Les vecteurs V et u, vecteurs unitaires définis par les extrémités de l'élément déterminent un plan P.

L'axe de la barre, le vecteur V normal à la barre, et l'axe z qui s'en déduit définissent le système local de la barre.

---

\* au lieu de I1 I2 on peut mettre I1 PAS IPAS I2

Le moment d'inertie  $I_{yy}$  est le moment par rapport au plan (P) ; si l'on se place dans le plan de section de la poutre, c'est aussi le moment par rapport à l'axe Y.

Le moment d'inertie  $I_{zz}$  est le moment par rapport au plan perpendiculaire à (P) et passant par i et j, ou si l'on veut le moment par rapport à l'axe Z.

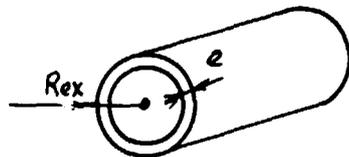
### 5) Option TUYAU

Elle permet la description des éléments de tuyauterie par la donnée des rayons et épaisseurs.

Il existe actuellement 5 types d'éléments de tuyauterie :

- la poutre classique qu'on décrira par l'option POUTRE

- le tuyau droit :



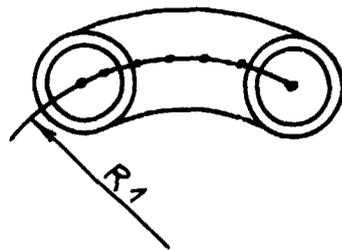
ITYP = 1

$r_{ex}$  rayon extérieur

$r_2$  rayon moyen

$e$  épaisseur

- le tuyau courbe



ITYP = 2

$r_{ex}$  rayon extérieur coefficient

$r_2$  rayon moyen de flexibilité:

$$\frac{1,65}{h}$$

$R_1$  rayon de courbure  $h = \frac{eR_1}{2r_2}$

L'arc de courbe est divisé en petits éléments droits.

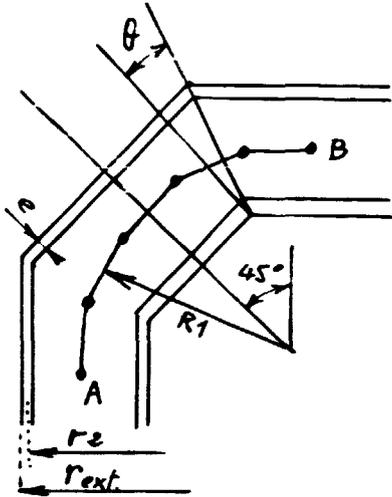
- l'élément quelconque

ITYP = 3 dont la matrice de rigidité est connue par ailleurs et introduite dans TEDEL.



matrice de rigidité introduite dans TEDEL.

- le coude à section elliptique à 90°



ITYP = 4

e épaisseur

$r_{ex}$  rayon extérieur

$r_2$  rayon moyen

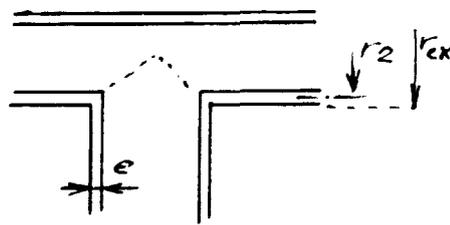
$R_1$  rayon de courbure  $\frac{r_2(1+\cot\theta)}{2}$

Le coefficient de flexibilité calculé par le programme est

$$k = \frac{1,52}{h^{5/6}} \text{ avec } h = \frac{R_1 e}{r_2}$$

est appliqué aux longueurs effectives d'arc (voir le schéma). Aussi pour le maillage on déterminera les extrémités A et B entre lesquelles on décrira un arc de cercle de rayon  $R_1$  et divisé en petits éléments droits, ou même deux arcs de cercle avec une partie droite entre les deux suivant la configuration du coude.

- le té non renforcé



ITYP = 5

e épaisseur nominale

$r_{ex}$  rayon extérieur

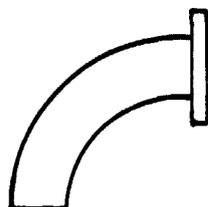
$r_2$  rayon moyen

Le coefficient de flexibilité est 1. Le té doit être remplacé par 3 éléments droits auxquels



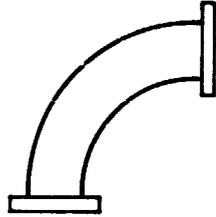
on appliquera les coefficients de majoration de contrainte.

- tuyau courbe avec une bride ou deux brides



ITYP = 21

Le coefficient de flexibilité est celui de ITYP = 2 multiplié par  $h^{1/6}$



ITYP = 22

Le coefficient de flexibilité  
est celui de ITYP = 2 multiplié  
par  $h^{1/3}$

Les coefficients de majoration  
de contrainte sont ceux de  
ITYP = 2.

Forme des données (exemple 2)

Mot option TUYAU

Eventuellement le mot **PRESSION** suivi de la valeur **P** de la pression afin de tenir compte de la correction apportée par la pression dans le calcul du coefficient de flexibilité.

Le mot **ASME** indiquant que les coefficients de flexibilité sont calculés suivant le code ASME.

Autant de fois que né- cessaire	{	<b>I1 I2 ITYP</b>	de l'élément I1 à I2 inclus, on précise
		ou	le type de l'élément
		<b>I1 <u>PAS</u> IPAS I2 ITYP</b>	
		Si <b>ITYP = 3</b>	pas d'autres données
		Sinon	
		<b>r<sub>ext</sub> e R<sub>1</sub></b>	<b>R<sub>1</sub> = 0</b> pour un tuyau droit = $\theta$ si <b>ITYP = 4</b> le programme calcule alors <b>R<sub>1</sub></b> ( $\theta$ en °)
		puis	
<b><u>NON</u></b>	indique que <b>TEDEL</b> choisit lui-même son		
ou	système local		
<b><u>VECTEUR</u></b>	suivi de <b>V<sub>1</sub> V<sub>2</sub> V<sub>3</sub></b> donnant les composantes de l'axe y local.		



Si le type 3 a été rencontré, on lira le mot

<b>SPECIAL</b>	puis
<b>ISUPOR</b>	n° de fichier où se trouve la ou les matrices de rigidité des éléments quel- conques.
<b>NDISPE</b>	n° de disque de stockage pour ces ma- trices.

Exemple de données (exemple 2)

TUYAU		PRESSION		0.01		ASME
1	10	1	500.	10.	0.	NON
11	22	2	500.	13.	1000.	VECTEUR 0. 0. 1.

6) Mot option RELATIONS

Cette directive facultative doit être lue dans la directive GEOMETRIE.

Elle permet de décrire certaines conditions aux limites portant sur les déplacements, symétries par rapport à des plans qui ne sont pas les plans du référentiel, périodicité.

D'une manière générale on peut écrire des relations du type

$$u_I = \alpha u_K + \beta u_i$$

où  $u_I, u_K, u_i$  représentent des inconnues quelconques.

Forme des données

RELATION

Autant de fois qu'il est nécessaire	{	NP	NS				
		I1	IP	IPAS			
		NS fois	{	$\alpha$	I <sub>2</sub>	IQ	JPAS

NP : nombre de relations à écrire.

I1, IP, IPAS : la variable considérée est de type I1, (1, 2, 3, 4, 5, 6 pour  $u, v, w, \psi_x, \psi_y, \psi_z$ ) pour les points IP, IP + IPAS, ... IP + (NP - 1) \* IPAS, I2, IQ, JPAS : la variable considérée est de type I2 pour les points IQ, IQ + JPAS, ... IQ + (NP - 1) \* JPAS.

On a écrit NP relations dont l'une quelconque i est

$$u_{IP + i * IPAS}^{I1} = \sum_{J = I, NS}^{I2_J} \alpha_j u_{IQ_J} + i * JPAS_J$$

Exemple : RELATION (exemple 3)

21	1	4	205	1	-1.	5	205	1
21	1	1	205	1	1.	2	205	1

On écrit 2 fois 21 relations.

Les relations permettent d'écrire pour les 21 points qui vont de 205 à 225 que

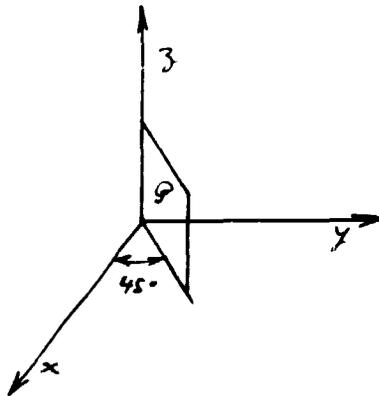
$$u = v$$

et

$$\psi_x = -\psi_y$$

c'est-à-dire une symétrie par rapport au plan P qui est un bissecteur.

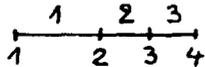
Pour achever d'écrire complètement la condition de symétrie il faudra imposer  $\psi_z = 0$ , ce qui pourra être fait dans la directive DEPLACEMENT.



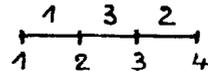
7) Mot option PERMUT (exemple 3)

Il se peut, dans certains cas, que les numérotations des points et des éléments soient indépendantes ; c'est-à-dire que l'ordre des éléments ne soit pas celui des points. Les exemples ci-dessous illustrent ces possibilités.

Cas 1 : l'ordre des éléments est celui des points



Cas 2 : l'ordre des éléments n'est pas celui des points

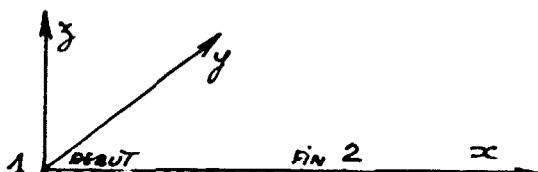


L'option PERMUT permet un rangement au moment du calcul des éléments (à l'intérieur du programme) afin de faciliter la constitution de la matrice de Rigidité. Cette option n'est pas nécessaire lorsque toute la matrice se trouve en mémoire centrale. Par contre, en mémoire lente, on doit la considérer comme obligatoire.

## II - Directive ARTICULER

Elle permet d'articuler certaines barres en leurs extrémités. En l'absence de cette directive tous les éléments s'encastrent les uns dans les autres.

On rappelle qu'à chaque élément est attaché un système local de coordonnées (x, y, z).



Cette option permet d'écrire que le moment autour de x, y ou z est nul en une extrémité, et par là de réaliser une condition de rotule. Ecrire par exemple que le moment  $M_y$  est nul à l'extrémité 1 revient à dire que la barre peut être rotulée dans un plan (x, z) local. La rotation  $\psi_y$  associée est éliminée pour cette barre et devient une variable interne qu'on ne retrouvera pas dans les sorties de déplacements et rotations exprimées dans le système général. Par contre cette rotation se retrouvera dans les impressions des rotations locales.

Chaque barre a un noeud de départ DEBUT et un noeud de fin FIN.

### Forme des données (exemple 3)

Le mot clé ARTICULER suivi, dans un ordre quelconque, de séquences en nombre quelconque et telles que

DEBUT	MOMENT	X	Y	FIN	MOMENT	Z	4	6	20
	PAS	1	30	33	67				
FIN	MOMENT	X	Y	Z	54	56			
DEBUT	MOMENT	Z	84	66	PAS	1	68	72	
etc...									

Ces données signifient pour la :

- 1ère séquence, que les barres 4, 6, 20 à 30 par pas de 1, 33, 67 sont articulées au premier noeud autour de X et Y, et pour le second noeud autour de Z.

- 2è séquence, que les barres 54 et 56 sont articulées au 2 noeud autour de X, Y et Z.

- 3è séquence, que les barres 84, 66 à 88 par pas de 1, 72 sont articulées au noeud de départ autour de Z.

**IMPORTANT**

Cette directive doit être placée, si elle est nécessaire, avant la directive MATER (voir exemple).

### III - Directive MATERIAU

Mot clé MATERIAU

Mot option TEMPERATURE indique qu'il faut lire  $\alpha$ , le coefficient de dilatation thermique

ou NON on ne lit pas  $\alpha$ .

Autant de fois qu'il est nécessaire.

I1 - I2 ou I1 PAS IPAS I2

De l'élément I1 à l'élément I2 inclus, les éléments auront les propriétés suivantes :

YG module d'Young

GU module d'élasticité transversal

ALFA coefficient de dilatation thermique.

ALFA n'est lu que si le mot TEMPERATURE a été rencontré.

Lorsque les données de cette directive sont épuisées, le programme calcule la matrice de rigidité de la structure, sauf si l'utilisateur a demandé une place en mémoire nulle pour cette matrice (NGMAX = 0), c'est le cas lorsqu'il utilise l'option DYNAMIQUE en recombinaison de modes.

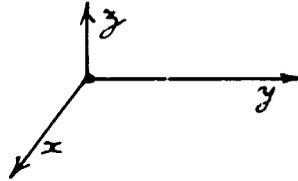
#### IV - Directive CHARGE

Mot clé CHARGE : ce mot est obligatoire. Toutes les autres options sont facultatives, et peuvent être utilisées dans n'importe quel ordre.

1) Mot option POIDS, puis autant de fois qu'il est nécessaire les données suivantes.

{ I1 - I2 ou I1 PAS IPAS I2  
De l'élément I1 à I2 inclus les éléments ont  
Pg : poids spécifique pour la zone considérée.

Le poids est dirigé suivant ZO si Pg est positif c'est-à-dire vers les "Z négatifs".



Pour cette directive il y a intégration exacte des forces volumiques.

2) Mot option FORCES

Cette directive permet la prise en compte des forces (ou moments) concentrées

Autant de fois qu'il est nécessaire. { IT : type de la force = 1 suivant OX  
= 2 suivant OY  
= 3 suivant OZ  
= 4 moment OX  
= 5 moment OY  
= 6 moment OZ  
IP : numéro du noeud  
F : valeur algébrique de la force  
ou  
IT  
IP mot PAS IPAS IQ  
F

La deuxième forme signifie : la force F, de type IT est appliquée des noeuds IP à IQ par pas de IPAS.

3) Mot option ROTATION

Cette directive permet le calcul automatique des efforts dans le cas d'une structure tournant autour de l'axe OZ.

Forme des données

ROTATION OMEGA : vitesse de rotation (radians/seconde)

La directive MASSE aura, dans ce cas été donnée avant CHARGE. Il n'est pas possible d'utiliser la matrice masse dans ce cas.

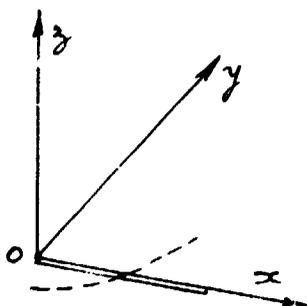
4) Mot option REPARTIES

Cette directive permet de calculer les forces aux noeuds dues à des efforts répartis sur des éléments de poutre (le poids en est un exemple).

Autant de fois qu'il est néces- saire	}	I1	De I1 à I2 par pas de IPAS,
		mot PAS	les éléments sont soumis à
		IPAS	la charge répartie Q suivant
		I2	la direction définie par ITYP
		ITYP : type de charge	
		= 1 suivant OX	7 suivant OX du trièdre local
		= 2 suivant OY	8 suivant OY " "
= 3 suivant OZ	9 suivant OZ " "		
		Q : valeur algébrique de l'effort par unité de longueur.	

5) Option THERMIQUE

Cette option de la directive CHARGE permet la lecture des températures des éléments de la structure, et éventuellement de courbures initiales. Pour l'introduction de ces courbures on donnera les valeurs algébriques s'exprimant dans le système des axes locaux attachés à l'élément.



$R_1$  : rayon de courbure dans le plan XOY ( $1/v''_{xx}$ )

$R_2$  : rayon de courbure dans le plan XOZ ( $1/w''_{xx}$ )

Forme des données

Mot option: THERMIQUE puis, autant de fois qu'il est nécessaire les données suivantes.

Le mot COURBURE éventuellement  
 I1 I2 de I1 à I2 inclus on aura les propriétés suivantes  
 ou  
 I1 PAS IPAS I2 : de I1 à I2 par pas de IPAS on aura  
 $\theta$  température moyenne  
 et si le mot courbure a été rencontré on donnera  $R_1$  et  $R_2$  les rayons de courbure initiaux.

Exemple des données

THERMI					
COURB		10	14	22	4000. 80000.
15	PAS	5	45	54	
45	50		62.		

## 6) Option ACCELERATION

Cette option fait partie de la directive CHARGE. Elle consiste après lecture de l'accélération et de sa direction, à calculer un vecteur force  $F = My$ .

Cela suppose donc que les masses ont été préalablement définies par la directive MASSE placée avant la directive CHARGE.

Dans ce cas on ne peut utiliser de matrice masse dans la directive MASSE, car le programme calcule  $F = My$  en supposant M sous la force d'un vecteur masse, c'est-à-dire de masses localisées.

### Forme des données

Mot option ACCELERATION

ITYP	:	=	1	accélération	suis	vant	X
		=	2	"	"	"	Y
		=	3	"	"	"	Z

GAMMA : valeur algébrique de l'accélération.

7) Option COMBINE

Cette option fait partie de la directive CHARGE et permet des combinaisons de charges telles que :

$$C = \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \dots$$

Les chargements  $C_1, C_2, C_n$  sont définis dans CHARGE et la procédure permet de lire les coefficients  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  et de sommer les cas de charge. Elle évite une combinaison fastidieuse à la main qui consisterait à former le cas de charge totale et à l'entrer tel quel sans l'option COMBINE.

Forme des données

CHARGE

<u>FORC</u>	}	définition du 1er cas de charge	
<u>REPAR</u>			
-----			
<u>COMBINE</u>	ALFA	NSTØ	valeur du coefficient, par lequel on multiplie le premier cas de charge et numéro d'un disque de stockage pour les cas de charge (nombre d'inconnues multipliées par n pour l'encombrement sur le disque)
<u>FORC</u>	}	définition du 2è cas de charge	
-----			
<u>ACCE</u>			
<u>COMBINE</u>	ALFA	NSTØ	

et ainsi de suite autant qu'il y a de cas de charges à combiner.

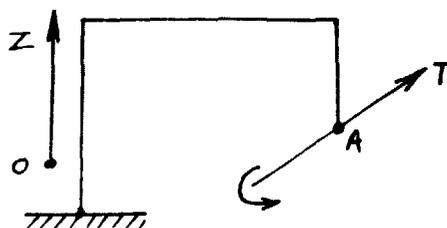
V - Directive IMPRIM

Elle permet d'imprimer les forces et moments aux noeuds. On obtient également les éléments de réduction à l'origine du système de forces agissant sur la structure : 3 composantes pour la résultante et 3 composantes pour le moment résultant.

Mot Imprim (voir exemple)

## VI - Directive APPUI

Cette directive permet d'ajouter à la matrice de rigidité des rigidités supplémentaires dues aux appuis (ressorts) ; par exemple une barre encastrée à une extrémité et fixé à la structure par son autre extrémité. Cette directive est utilisée dans l'exemple 4 pour tenir compte en A d'une rigidité suivant OZ et d'une rigidité à la rotation autour de l'axe AT.



Mot APPUI puis autant de fois qu'il est nécessaire les données suivantes

IP : numéro du noeud

ITYP : type de rigidité

RIGI : valeur de la rigidité

(coefficient  $\frac{F}{\delta}$ , où F est une force ou un moment  $\delta$  un déplacement ou rotation) ; RIGI est toujours positif.

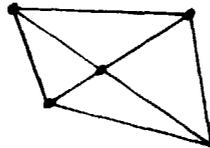
### TYPES DE RIGIDITE

ITYP	SIGNIFICATION
1	déplacement suivant OX
2	déplacement suivant OY
3	déplacement suivant OZ
4	rotation suivant OX
5	rotation suivant OY
6	rotation suivant OZ

Cette option directive se place après la constitution de la matrice de rigidité (directive MATER) et ne peut être utilisée que pour le premier cas de charge.

### VII - Directive MASSE

On y précise la masse spécifique des éléments.  
On peut lire également des masses ou moments d'inertie additionnels afin de simuler des parties massiques non prises en compte par les éléments (voir schéma ci-dessous).



Forme des données (voir exemple)

Mot clé MASSE

Mot facultatif MATRICE puis NM numéro du fichier de la matrice  
masse  
puis autant de fois qu'il est nécessaire

{ I1 I2  $\rho_m$  ou I1 PAS IPAS I2  $\rho_m$   
De l'élément I1 à I2 inclus la masse spécifique  
est  $\rho_m$ .

Puis si le mot ADDITION est lu, on donnera :

NZONE nombre de masses additionnelles à lire

NZONE fois { ITYP : type de masse (= 1, pour u,v,w ; = 4,5,6  
pour  $\psi_X, \psi_Y, \psi_Z$ )  
= 7 masse et amortissement lus n'agissent  
que selon X  
= 8 masse et amortissement lus n'agissent  
que selon Y  
= 9 masse et amortissement lus n'agissent  
que selon Z  
IP : numéro du noeud  
AM : masse ou moment d'inertie

mot TERMINE

Le mot **TERMINE** termine cette directive et est obligatoire. On attire à nouveau l'attention de l'utilisateur sur le choix des unités (facteur g).

L'option matrice **MASSE** ne peut être utilisée que lorsqu'on est en mémoire lente.

### VIII - Directive DEPLACEMENT

Cette directive permet d'imposer les déplacements en certains noeuds.

#### Mot DEPLACEMENT

Autant de fois que nécessaire

{ ITYP I1 V : type du déplacement imposé, numéro du noeud, valeur du déplacement imposé.

ou

{ ITYP I1 mot PAS IPAS I2 V  
type du déplacement, du noeud I1 au noeud I2 (y compris) par pas de IPAS le déplacement imposé vaut V (voir exemples).

TABLE DES TYPES

ITYP	SIGNIFICATION
1	Déplacement en X
2	déplacement en Y
3	déplacement en Z
4	rotation imposée autour de OX
5	rotation imposée autour de OY
6	rotation imposée autour de OZ
7	les 3 rotations et les 3 déplacements sont bloqués.

Remarque : Lorsqu'on utilise la deuxième forme de données (ITYP I1 PAS IPAS I2 V) et que ITYP vaut 7 il est inutile de donner V ; par contre dans la première forme, il faudra donner V égal à zéro.

Cette directive ne peut être utilisée que pour le 1er cas de charge.

### IX - Directive SYMETRIE

Cette directive permet d'indiquer les symétries par rapport à un ou plusieurs plans parallèles aux plans du système de coordonnées, YOZ, XOZ, XOY.

Mot SYMETRIE

Autant de fois que nécessaire } ITYPE : type de symétrie  
Il mot PAS IPAS I2 Du noeud I1 à I2 (y compris) par pas de IPAS on a la condition de symétrie de type ITYP (voir exemples)

TABLE DES TYPES

ITYP	SYMETRIES PAR RAPPORT A UN PLAN PARALLELE A
1	YOZ
2	XOZ
3	XOY

Cette directive ne peut être utilisée que pour le premier cas de charge.

### X - Directive VARIABLE

Cette option sert à modifier la valeur des déplacements imposés lors des différents cas de charge.

On peut faire l'opération suivante :

- un noeud quelconque a un déplacement imposé nul ou non nul déclaré dans DEPLACEMENT (ou Symétrie),
- le premier cas de charge sera calculé avec la valeur précédente,
- cette valeur de déplacement imposée peut être modifiée pour les autres cas de charge par l'option VARIABLE.

Forme des données et exemple :

Mot clé VARIABLE

Autant de fois que nécessaire	{	ITYP type de variable (1,2,3,4,5,6) par u,v,w, = 7 encastré
		IP numéro du point ou I) <u>PAS</u> IPAS I2
		U valeur du déplacement

Exemple

Titre

.....

CHAR

DEPLA

.....

3 6 0.

w fixé par le point 6

CALCUL

FIN

TITRE

.....

CHAR

VARI 3 6 1

nouveau cas de charge  
w = 1 mm pour le point 6

SUITE

FIN

XI - Directive SOMME

Elle permet dans TEDEL de combiner les résultats de plusieurs cas de charges, résultats qui auront été inscrits sur bande magnétique à l'aide des directives MODE ou TRACER. Il est inutile dans ce cas de retrouver la place par la matrice de rigidité (on mettra donc NGMAX = 0), ainsi que de définir les conditions aux limites de forces ou déplacement.

Forme des données

Titre

N éléments 0 N points 0 0

GEOM .....

.....

MATER.....

.....

.....

VERIF.....

.....

Eventuellement TRACER ou Mode pour mettre les résultats sur bande magnétique

SOMME

mot clé SOME N BAND : numéro de la bande  
NZONE

NZONE	}	ICHA	numéro du cas de charge sur la bande
fois		COEF	coefficient associé

FIN

On peut remettre un titre et reprendre la procédure SOMME

Remarque : il est inutile de faire figurer les cas de charge pour lesquels le coefficient est nul.

## XII - Directive VERIFICATION

Elle permet une interprétation automatique des contraintes calculées pour les éléments de tuyauterie. Cette interprétation est celle de l'ASME [Réf 2], dans laquelle on calculera une contrainte équivalente avec éventuellement des coefficients de majoration dans les coudes, qu'on comparera à  $S_m$ , ou  $S_p$  en ce qui concerne la fatigue.

Trois types de vérification en classe I\* sont faites automatiquement par TEDEL. On les rappelle brièvement :

$$1) \text{ Type I} \quad \frac{B_1 P D}{2e} + B_2 \frac{M}{I/v} = \sigma \leq 1,5 S_m$$

D diamètre P pression e épaisseur M moment =  $\sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2}$   
I/v distance de la fibre extrême à la fibre neutre.

$$2) \text{ Type II} \quad \frac{C_1 P_0 D}{2e} + C_2 \frac{M}{I/v} + \frac{I}{2(I-v)} E\alpha |\Delta T_1| = \sigma \leq 3 S_m$$

E,v : module d'Young

$\alpha$  : coefficient de dilatation thermique

$|\Delta T_1|$  : valeur absolue du gradient thermique dans l'épaisseur (variation linéaire).

$$3) \text{ Type III} \quad K_1 C_1 P_0 \frac{D}{2e} + K_2 C_2 \frac{M}{I/v} + \frac{I}{2(I-v)} K_3 E\alpha |\Delta T_1| = \sigma \leq 2 S$$

Les coefficients  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  sont en mémoire dans TEDEL et sont fonction du type d'élément (tuyau droit, courbe, coude à 90°). Le coude à 90° et le té non renforcé ne figurent pas en classe I ; une certaine interprétation est nécessaire.

\*Il est possible de programmer d'autres vérifications.

Dans le tableau relatif à la classe II, on constate que les coefficients de majoration de contrainte en ce qui concerne le coude rond, le coude à 90°, le Té non renforcé, s'expriment à l'aide de la même formule  $\frac{0.9}{h^{2/3}}$ . Seule la valeur de h est différente pour chacun de ces éléments de tuyauterie. Aussi après avoir correctement calculé h, on est ramené au calcul de vérification en classe I des coudes ronds. Ce qui revient à dire qu'un té ou un coude à 90° sont traités en classe I comme les coudes ronds, avec une valeur particulière de h. Cela est fait automatiquement par TEDEL.

Ces trois vérifications ne peuvent pas être faites simultanément, car pour chacune d'elles le type de chargement est différent, on se reportera aux spécifications ASME pour la définition de ces chargements.

Le programme, lorsqu'on a choisi un type de vérification, calcule les contraintes aux noeuds, ainsi que les coefficients

$$\frac{\sigma}{1,5S_m} \text{ ou } \frac{\sigma}{3S_m} \text{ ou } \frac{\sigma}{2S_p} \text{ et donne le coefficient}$$

maximum pour la structure.

#### Forme des données

Cette directive se place avant les mots CALCUL, ou SUITE provoquant le calcul des déplacements.

#### Mot VERIFICATION

Le mot ASME puis ITYP = 1, 2, 3 suivant la vérification

puis S =  $S_m$  ou  $S_p$  suivant le cas.

éventuellement PRESSION puis la valeur de P que l'on veut voir figurer dans le calcul des contraintes.

éventuellement le mot DELTA pour la lecture des  $|\Delta T_1|$

puis autant qu'il est nécessaire les données suivantes.

{ I1 I2 de l'élément I1 à I2 inclus  
| $\Delta T_1$ | on a la valeur de  $\Delta T_1$

En l'absence d'options PRESSION ou DELTA,  
P et  $|\Delta T_1|$  sont nuls.

Cette directive se conserve d'un cas de charge à  
un autre. Sa redéfinition entraîne l'annulation de la précédente.

Exemples des données (exemple 2)

VERIF	ASME	1	30
PRESSION		0.04	
CALCUL			
FIN			
TITRE			
CHARGE			
....			
VERIF	ASME	2	30
PRESSION		0.02	
DELTA			
1	130	100	
SUITE			

Utilisation de la directive VERIFICATION pour les éléments de poutre.

Une option permet de combiner les différents moments et l'effort de membrane pour en déduire une contrainte. Pour cela on s'est inspiré de ce qui est fait pour les tuyaux.

L'utilisateur aura défini les différents  $v_i$ .

(distances de la fibre neutre à la fibre extrême) associés aux trois moments.

Tedel calcule une contrainte qui est égale à :

$$\sigma = \sqrt{\underbrace{\left[ \frac{M_1}{I_{Y/v_Y}} \right]^2 + \left[ \frac{M_2}{I_{Y/v_Y}} \right]^2}_{\text{flexion}} + \underbrace{\left[ \frac{T_0}{I/v} \right]^2}_{\text{torsion}} + \underbrace{\sigma_B^2}_{\text{membrane}}}$$

Cette contrainte  $\sigma$  est analogue de  $\frac{M}{I/v}$  calculée pour les éléments de tuyaux.

A cette contrainte, on applique les différents coefficients  $B_1, B_2, C_1, C_2, K_1, K_2, K_3$  pour les comparaisons à  $1,5 S_m, 3 S_m, 2 S_p$ .

$$B_1 = C_1 = 0 \quad B_2 = C_2 = 1 \quad K_1 = K_2 = K_3 = 1$$

Forme des données

Pour définir les  $V_i$  on mettra, après le mot REVOLUTION ou NON le mot FIBRE. Si le mot a été mis on donnera, à la suite des données d'inerties et de vecteur  $\vec{V}$ ,

- V, pour les poutres de révolution

-  $\underbrace{V_y, V_z, V_T}$  pour les poutres non de révolution

le même ordre que celui des inerties

EXEMPLE

POUTRE	REVO	FIBRE			
10	20	1000	14+7	2E+7	
	25				
OU	POUTRE	NON	FIBRE		
10	20	1000	1E+7	3.E+7	4.E+7
0	0	1	25.	40.	50.

XIII - Directives NOCONT-NOIMPRIM

Le mot clé NOCONT placé avant CALCUL ou SUITE indique que l'on ne calcule pas de contraintes.

NOIMPRIM placé avant GEOMETRIE indique qu'il n'y aura aucune des impressions décrivant la géométrie et les propriétés du matériau.

XIV - Directives CALCUL, SUITE, FIN

La directive CALCUL ne s'emploie que pour le premier cas de charge. Il lui correspond deux fonctions :

- inversion de la matrice,
- calcul de la solution.

A la directive SUITE correspond la fonction :

- calcul de la solution, la matrice ayant été déjà inversée. Cette directive ne peut être employée qu'à partir du deuxième cas de charge (voir exemple n°2).

Directive FIN

Ce mot indique la fin d'un cas de charge et le programme retourne vers la lecture d'un nouveau cas de charge.

## XV - Directive VIBRATION

Elle permet soit :

- de rechercher les fréquences et modes de la structure (ISOU = 0 ou 2)
- une recherche automatique de la fréquence propre la plus proche de fréquences données (ISOU = -1),
- de trouver la réponse (déplacements, contraintes) à une sollicitation sinusoïdale de fréquence  $f$ , d'amplitude définie par la directive CHARGE (ISOU = 1).

Mot VIBRATION

ISOU = 0, = 1, = -1, = 2

NBAND : numéro du disque de stockage pour la matrice de rigidité

NF : nombre de fréquences (doit être inférieur ou égal à NFREQ)

F1 : 1ère fréquence (Si ISOU = -1 on cherche la fréquence la plus proche de F1).

DX : pas en fréquence (sans importance si NF = 1).

Le programme calcule NF fréquences qui sont :

$F1, F1 + DX, F1 + 2DX, \text{etc...}$  Dans cette gamme de fréquences le programme recherche les modes et fréquences propres dans le cas ISOU = 0 ou 2 ; on calcule la réponse pour chaque fréquence dans le cas ISOU = 1 (voir exemple 4).

Remarque :

Si  $ISOU = -1$  et que  $NF > 1$  on fera une recherche de fréquences les plus proches de celles données. Il y aura  $NF$  inversions de matrice et les résolutions correspondantes.

$ISOU = 2$  mêmes données que  $ISOU = 0$   
mais moins d'inversions.

XVI - Directive MODE - Directive TRACER

1) Directive MODE

Elle est à utiliser en même temps que la directive VIBRATION lorsqu'on effectue une recherche des modes propres et que l'on désire écrire le fichier des résultats (déplacements, éventuellement contraintes) sur bande magnétique. Cette option doit précéder l'option VIBRATION. Elle est nécessaire, si par la suite on désire étudier la réponse de la structure à un chargement variable dans le temps.

Forme des données

mettre le mot MODE puis

IBAND IS NOIMP

IBAND : numéro logique de la bande

IS : nombre de cas figurant déjà sur la bande et qu'il faudra sauter pour écrire à la suite.

NOIMP : = 0 pas d'impression des contraintes  
= 1 impression de contraintes.

Dans tous les cas les contraintes, si elles sont calculées, sont mises sur bande magnétique.

2) Directive TRACER

Elle permet d'écrire les résultats sur bande magnétique pour un traitement ultérieur.

Forme des données

Avant CALCUL ou SUITE on mettra le mot TRACER

IBAND : numéro logique de la bande.

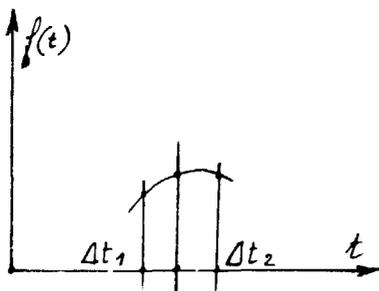
## XVII - Directive DYNAMIQUE

### Recombinaison de modes propres

Elle permet d'obtenir la réponse de la structure à un chargement variable dans le temps.

Il est nécessaire d'avoir au préalable effectué une recherche de modes propres, et que ces données figurent sur un fichier (Option MODE).

Le chargement (C) variable dans le temps est supposé être représenté à l'intérieur de chaque pas à l'aide d'une fonction parabolique :



$C = C_0 f(t)$  où  $f(t)$  est une forme parabolique.

Le choix de la forme parabolique permet un calcul analytique exact de la réponse à l'intérieur du domaine  $\Delta T_1$ .

Cette directive ne nécessite aucune place pour la matrice de rigidité, il sera nécessaire de donner la valeur 0 à NGMAX.

Les modes propres satisfaisant aux conditions aux limites de déplacements imposés, il est inutile d'utiliser les directives RELATIONS, DEPLACEMENTS et SYMETRIE.

Si la directive MASSE est utilisée pour la définition des charges, on ne peut utiliser l'option matrice masse.

Forme des données

Mot clé DYNAMIQUE

NMOD fois { NMOD, nombre de modes (< NFREQ)  
F : fréquence des modes

IBAND : numéro logique de la bande où se trouve les modes

IDIS : numéro logique du disque d'accès direct où seront stockés les modes.

Mot INITIAL suivi des mots REPOS : la structure est au repos  
ou

IMPULSION : on donnera une vitesse initiale à chaque noeud, telle que :

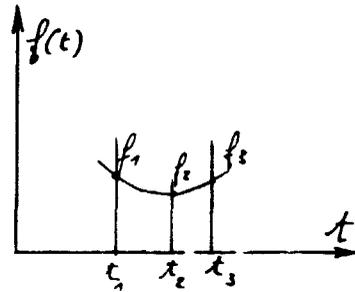
$$v = \frac{F \cdot \Delta T}{m}$$
 où F et m sont respectivement la force et la masse relatives à chaque noeud. L'impulsion  $F \times \Delta T$  sera décrite dans la directive CHARGE. Puis éventuellement le mot AMORTISSEMENT suivi des amortissements réduits pour chaque mode. Puis la directive CHARGE suivie de ses données puis la directive PAS puis autant de directives PAS, CHARGE, PAS, PAS qu'il est nécessaire.

Le mot FIN terminera la séquence.

Directive PAS

Mot clé PAS suivi de  $\Delta T$  : valeur du pas (secondes)

IPAS : nombre de points de calcul et de sortie des résultats à l'intérieur du pas. Ce nombre est sans rapport avec la précision des calculs à l'intérieur du pas, puisque la réponse s'exprime analytiquement dès lors que le chargement



a une forme parabolique à l'intérieur du pas, puis les 6 valeurs suivantes décrivant la parabole  $f(t)$  à l'intérieur de  $\Delta T$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 \quad t_1 \\ f_2 \quad t_2 \\ f_3 \quad t_3 \end{array} \right.$$

$f_1, f_2, f_3$  sont les valeurs de  $f(t)$  pour 3 temps  $t_1, t_2, t_3$  ; ces trois couples définissant la parabole qui approche le mieux  $f(t)$ .

Exemple d'utilisation de la directive DYNAMIQUE

Carte titre

1368 0 225 0 20 : 1368 éléments  
NGMAX = 0 pas de matrice de rigidité  
225 points  
20 fréquences

NOIMPRIM NOCONT

GEOM QUEL 5

maillage

TUYAU.....

MATER...

MASSE 1 1368 7.8 E-10 ADDI ... TERM

DYNAM 3 8. 34.2 39.02

11 10

AMOR 0. 0. 0.

INIT REPOS

CHAR .....FORC.....

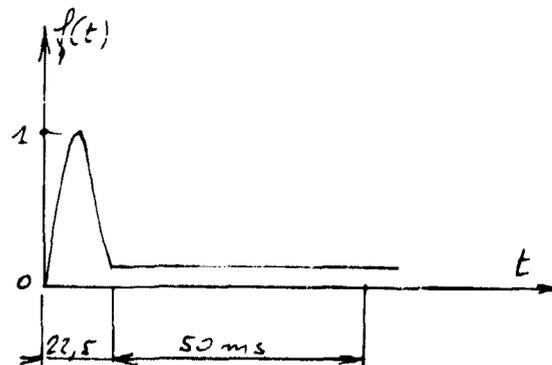
IMPRIM

PAS 22. 5E-3 4 0. 0. 1. 11. 25E-3 0. 22. 5E-3

PAS 50. 0E-3 6 22.5E-3 0. 50.E-3 0. 72.5E-3

FIN ↑ 0.

On étudie le comportement de la structure sous le chargement défini par CHARGE : la fonction  $f(t)$  ayant l'allure suivante.



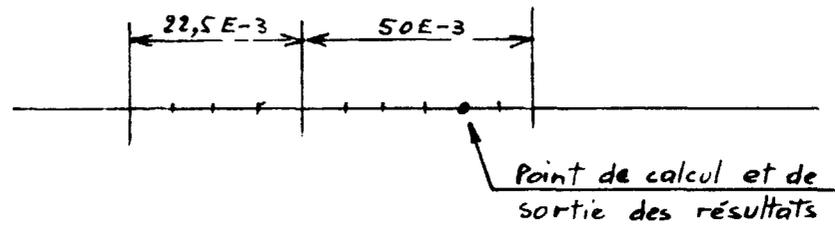
On obtiendra l'impression des résultats à :

$$T = \frac{1 \times 22,5 \cdot 10^{-3}}{4}, \frac{2 \times 22,5 \cdot 10^{-3}}{4}, \frac{4 \times 22,6 \cdot 10^{-3}}{4}$$

puis

$$T = 22.5E-3 + 1 \times \frac{50 \cdot 10^{-3}}{6}$$

$$T = 22.5E-3 + \frac{4 \times 50 \cdot 10^{-3}}{6}$$



### XVIII - SORTIE DES RESULTATS

Toutes les données lues sont imprimées par le sous-programme de lecture sans format.

Le programme imprime la taille de la mémoire allouée nécessaire (en milliers d'octets) ; ce nombre ajouté à l'encombrement des instructions du programme donne l'encombrement à faire figurer sur la carte JOB.

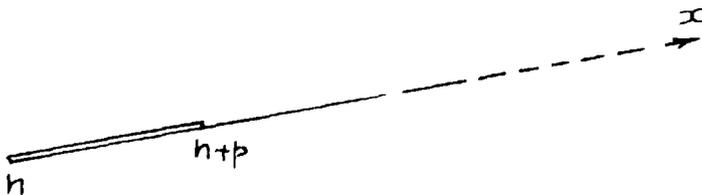
On imprime également tout ce qui concerne les éléments :  
coordonnées des points, numérotation des sommets, section droite, moments d'inerties ( $I_1$ ,  $I_2$ , moments de flexion,  $J$  moment de torsion), module d'Young, coefficient d'élasticité transversal, etc...

Après le mot CALCUL ou le mot SUITE, il y a impression des résultats suivants :

- Déplacements  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,
- Rotations  $RX$ ,  $RY$ ,  $RZ$ ,
- Efforts généraux et contraintes (si l'option NO CONTRAINTE n'a pas été utilisée) conformément à la note ci-après.

#### Note sur les efforts généraux et les contraintes

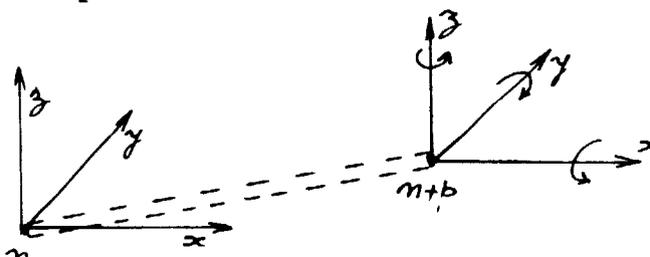
Orientation de chaque élément chaque élément est orienté du  $n^\circ$  de noeud le plus faible vers le noeud du  $n^\circ$  le plus grand (axe  $Ox$ ).



l'axe  $Ox$ , complété par les  $Oy$  et  $Oz$  (cf. I. Directive GEOMETRIE) constitue le système local.

Définition des efforts généraux. Ce sont les composantes de l'action de la partie située du côté des x croissants sur la partie du côté des x décroissants (orientation propre à chaque élément).

Les composantes sont :



Moment de torsion suivant x  
Moment de flexion MY suivant y  
Moment de flexion MZ suivant z  
Effort tranchant TY suivant y  
Effort tranchant TZ suivant z

Contrainte longitudinale

$$\frac{N_x}{\text{Section}} (N_x \text{ suivant } x)$$

Sortie pour éléments de poutre

Les efforts généraux sont édités aux deux extrémités de chaque élément.

Sortie pour éléments de tuyauterie : droit, courbe, coude à 90°

En plus des impressions précédentes on imprime les contraintes aux extrémités et leur rapport par rapport à  $1,5 S_m$ ,  $3 S_m$ ,  $2 S_p$  si l'on a utilisé l'option VERIFICATION.

Sortie d'éléments quelconques

On imprime les efforts aux noeuds dans le système local.

## XIX - ORDRE DES DIRECTIVES

GEOMETRIE est obligatoirement la première ; la seconde est éventuellement ARTICU, puis MATERIAU.

Puis le mot CHARGE car il provoque la mise à zéro de tous les efforts.

A chaque directive il correspond une fonction, et il faut en assurer un certain nombre pour obtenir le résultat. L'ordre dans lequel doivent se présenter ces directives est l'ordre logique des opérations qui conduirait au résultat. Par exemple on définira les CHARGES, puis éventuellement la température, les conditions aux limites de déplacement (DEPLACEMENT et SYMETRIE), puis les mots CALCUL, SUITE, puis FIN. (Voir les exemples).

XX - REPONSE DYNAMIQUE PAS A PAS  
REGIME ELASTIQUE

a) Charges

Il est nécessaire de préciser la forme du chargement au cours du temps. La directive CHARGE ayant défini un chargement  $F_0(x)$ , on admet que, au cours du temps, la charge  $F(x,t)$  est représentée par :

$F(x,t) = F_0(x) \times f(t)$  (voir le § chargements complexes)

où  $f(t)$  est une fonction qu'on donnera point par point.



On précisera la valeur de  $f(0)$  et une série de valeurs discrètes entre lesquelles TEDEL interpole de façon parabolique pour obtenir les valeurs de  $f(t)$  aux différents pas de calcul : (le pas utilisé pour décrire  $f(t)$  et le pas du calcul étant en général différents).

L'étude des séismes peut nécessiter l'introduction de courbes donnant les déplacements au cours du temps. La directive DEPLA ayant défini un champ de déplacements imposés  $\delta_0$ , les déplacements au cours du temps sont supposés être représentés par  $\delta(x,t) = \delta_0 \times f(t)$ , de même que pour les données des charges.

La structure est supposée être au repos. On peut imposer des vitesses initiales aux noeuds désirés.

b) Pas du calcul

Le pas est constant. Le schéma numérique est implicite et stable. Une bonne précision est obtenue pour un pas voisin de  $\frac{1}{50^e}$  de la période correspondant au phénomène intéressant.

c) Sorties

Les sorties se font à la demande de l'utilisateur qui précisera les points de calculs où il veut soit une impression des déplacements, soit l'impression des déplacements et des contraintes.

d) Amortissement

Il est possible de tenir compte de l'amortissement, sous forme d'amortissement spécifique (de même que la masse) et éventuellement sous forme d'amortissements additionnels ajoutés en certains noeuds (option ADDI).

Dans le programme l'amortissement est traité sous forme de matrice diagonale appliquée à la vitesse (type visqueux).

e) Forme des données (exemple 6)

Après la carte TITRE on placera les mots :

DYNAMIQUE

éventuellement le mot AMORTISSEMENT

puis

NDYN : numéro de fichier d'accès direct nécessaire aux calculs dynamiques. La carte de contrôle relative à ce fichier devra réserver une place sur disque légèrement supérieure à celle nécessaire pour stocker la matrice de rigidité.

A la fin de la directive CHARGE on placera le mot EVOLUTION puis :

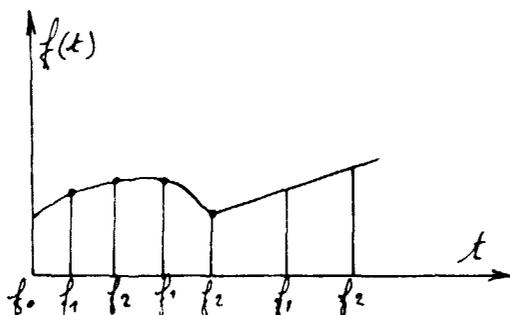
HPAS : valeur du pas en secondes

FO : valeur de  $f(0)$

NZONE : nombre de zones à lire et définissant  $f(t)$

NZONE fois  $\left\{ \begin{array}{l} f_1 \quad I_1 \\ f_2 \quad I_2 \end{array} \right.$  valeurs de  $f(t)$  au pas  $I_1$  et  $I_2$

Le programme interpole (si cela est nécessaire) de façon parabolique entre  $f_0$  et  $f_2$ , puis  $f_2$  ancien et  $f_2'$ , etc...



Le dernier numéro de pas lu est le nombre total de pas de calcul.

NI : nombre de valeurs des pas où l'on désire des sorties.

NI fois ( I : numéro de pas. )

Si I est négatif seuls les déplacements et les vitesses sont imprimés au pas I.

Les contraintes ne sont pas calculées, donc pas imprimées.

Si I est positif on imprime pour ce pas les déplacements, puis les vitesses, on calcule les contraintes, et

on les imprime sauf si le mot NOCOIMPR a été rencontré. La directive NOCONT si elle a été lue évite de toute façon le calcul des contraintes.

Si l'on désire introduire en plus du chargement, des vitesses initiales on mettra le mot IMPULSION dans la directive CHARGE. Ces vitesses seront lues (seulement si le mot IMPULSION a été lu) après le mot CALCUL sous la forme suivante

Mot VITESSE

NZONE

NZONE	}	ITYP : type de vitesse 1,2,3,4,5,6 pour u,v,w
		$\varphi_X, \psi_Y, \psi_Z$
fois		Il mot PAS IPAS I2 V
		De I1 à I2 par pas de IPAS la vitesse vaut V

Lorsque l'option amortissement a été lue, il faudra, dans la directive MASSE, donner après la masse spécifique, la valeur de l'amortissement spécifique. De même dans l'option ADDI il faudra donner après les masses additionnelles, les amortissements additionnels.

## XXI - CALCUL DES CHARGES CRITIQUES DE FLAMBAGE

### EFFET DES TENSIONS SUR LE CALCUL DES FREQUENCES PROPRES

#### a) Flambage

A un champ de tensions symbolisé par N il correspond l'énergie "de flambage"  $W_f = \frac{1}{2} \int [N_X \omega'_X]^2 dv$  où  $\omega'$  est la dérivée de la flèche. Cette énergie est mise sous forme matricielle.

$$W_f = X^T K_f X \text{ où } X \text{ est le vecteur déplacement.}$$

Chercher la charge critique correspond au problème suivant.

Un déchargement  $F_0$  a conduit après un calcul élastique à un champ de tensions N avec lesquelles on peut calculer la matrice  $K_f$ . Trouver le chargement critique revient à chercher le plus petit  $\omega$  tel que  $K + \omega K_f$  soit singulier ( $K$  matrice de rigidité élastique normale). Ce problème est analogue à celui de la recherche de la première fréquence propre.

#### Forme des données (exemple 3)

Avant le mot CALCUL on mettra les données suivantes :

Le mot FLAMBAGE

NS : numéro de fichier ou de bande pour sauver la matrice de rigidité

NBAND : numéro de fichier identique à celui de la directive VIBRATION.

puis les directives CALCUL

VIBRATION - 1 NBAND 1 f<sub>1</sub> 0.

Comme seule la plus petite valeur de  $\omega$  est intéressante on converge vers la valeur la plus proche de  $f_1$  (ISOU = 1). Si l'on a aucune idée on mettra  $f_1 = 0$ .

La directive VIBRATION fonctionne comme dans le cas de la recherche d'une fréquence propre.  $(K - \omega^2 M) X = 0$ . Aussi la valeur de la fréquence imprimée est sans intérêt. Le carré de pulsation est la valeur critique cherchée.

b) Effet des tensions sur les fréquences propres

Il est nécessaire d'effectuer un calcul préalable du champ de tensions. Le programme constitue alors la matrice  $K_f$  qui est alors ajoutée à la matrice de rigidité.

$$K' = K + K_f$$

On utilise ensuite normalement la directive VIBRATION pour la recherche des fréquences propres.

Forme des données

Avant le mot CALCUL mettre :

le mot	TENSION	
	NS	} même signification que dans le cas du flambage.
	NBAND	
puis	CALCUL	

et les directives MASSE et VIBRATION.

## XXII - SAUVETAGE DES MATRICES DE RIGIDITE

### REPRISES

Cette opération peut s'avérer nécessaire et rentable si l'on a à effectuer plusieurs cas de charge, en plusieurs passages.

Les mots SAUVER ou RESTITUER suivis d'un numéro de fichier ou bande magnétique sauveront ou restitueront une matrice de rigidité. Ces ordres s'exécuteront dès qu'ils seront lus.

#### a) Option SAUVER (exemple V)

Placée après MATER et avant DEPLA et SYMET cette option sauve la matrice ASSEMBLEE.

Placée après CALCUL cette option sauve la matrice INVERSEE avec les conditions aux limites de déplacement.

#### b) Option RESTITUER (exemple V)

Doit s'employer avant la directive MATER pour éviter un calcul de la matrice.

Suivant qu'elle a été sauvée inversée ou non on utilisera SUITE ou CALCUL pour les cas de charges.

L'option RELATION doit être donnée dans tous les cas.

Par contre si la matrice sauvée était inversée les directives DEPLACEMENTS et SYMETRIES ne doivent pas être données.

Exemples V

Titre  
 100 3000 200 0 1 DISQUE  
 GEOM....  
 RELATION  
  
 MATER  
 CHAR  
 EPLA  
  
 CALCUL  
 SAUVER 11  
 FIN

Titre  
 .....  
 GEOM  
 RELATION  
 RESTITUER 11  
 MATER  
 CHAR  
  
 SUITE  
  
 FIN

Titre  
 .....  
 GEOM  
  
 MATER  
 SAUVER 11  
  
 CHAR  
 DEPLA  
  
 CALCUL  
 FIN

Sauvetage de matrice inversée

Matrice inversée restituée  
 pas de déplacements imposés  
 emploi du mot SUITE éventuellement VARI  
 On peut travailler en plasticité.

Sauvetage de matrice assemblée non inversée

Titre  
 .....  
 GEOM  
 RELA...  
 RESTITUER 11  
 MATER  
 CHAR  
 :  
 DEPLA  
 CALCUL  
 FIN  
 Matrice assemblée restituée



EXEMPLE D'UTILISATION

COMMENTAIRE

1) SAUVETAGE

DYNAM PLAS 2

GEOM

REPRISE 0 12 3 10 15 20

On sauvera aux pas  
10 15 20 et arrêt à 20

MATER

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

A moins de cartes GO.FT.  
particulières le sauvetage  
du pas 15 détruit les  
résultats du pas 10

EVOL

Dans EVOL on avait déclaré  
100 pas par exemple

CALCUL

FIN

II) REPRISE + SAUVETAGE

DYNAM PLAS 2

On remet toutes les données  
jusqu'à MATER

GEOM

y compris

REPRISE est avant MATER

REPRISE 12 13 2 25 30

MATER

SUITE

SUITE est immédiatement  
après MATER

FIN

Dans le cas où on met les  
résultats sur bande en vue  
des tracés, il faudra changer  
de LABEL ou se positionner en  
fin de bande.

XXIII - CHARGES COMPLEXES EN DYNAMIQUE PAS A PAS

L'évolution des charges au cours du temps peut être telle qu'on ne puisse pas les représenter sous la forme :  $F(x,t) = F_0(x) \times f(t)$ .

Aussi une procédure plus générale peut être utilisée. On admettra que l'on peut représenter  $F(x,t)$  sous la forme :

$$F(x,t) = \sum_i F_0^i \times f^i(t)$$

Les différentes charges  $F_0^i(x)$ , ( $i > 1$ ) seront décrites par les directives CHARGES et les directives fonctions  $f^i(t)$  seront décrites par point par une directive EVOLUTION.

Forme des données (exemple VI)

Après la carte titre mettre le mot COMPLEX  
puis ND NC MAXPAS

ND : numéro du disque où seront stockés les chargements supplémentaires.

NC : nombre de chargements supplémentaires  $F_0^i$  ( $i > 1$ ).

MAXPAS : entier > au nombre de pas en temps.

Après le mot CALCUL et éventuellement après la bande des vitesses initiales, on définira les charges supplémentaires.

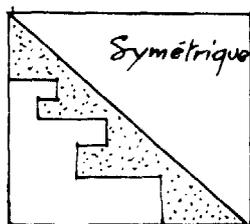
{	FORC, .....	}	options de la directive CHARGE
	.....		
	.....		
	EVOLUTION....		décrit $f^i(t)$
	FIN		termine la description du chargement.
	.....		

La valeur du pas, le temps total du phénomène (dernier numéro de pas lu), les numéros des pas pour la sortie des résultats, doivent être les mêmes dans chaque directive EVOLUTION (voir exemple VI).

Puis le FIN habituel.

## XXIV - GESTION DE LA MEMOIRE

La taille du programme étant fonction des données (nombre de points, d'éléments, nombre de valeurs dans la matrice de rigidité) l'utilisateur réglera l'encombrement demandé sur la carte JOB en fonction de la taille nécessaire. La mémoire allouée est imprimée, immédiatement derrière le premier groupe de données (NTMAX, NGMAX...NFREQ).



La donnée de NGMAX, taille de la matrice, peut parfois poser une petite difficulté. La demi-matrice de rigidité ayant, par exemple, l'allure indiquée par le schéma ci-contre, NGMAX est le nombre d'éléments dans la zone hachurée. Il est parfois aisé d'en avoir un ordre de grandeur, c'est le cas d'un "problème à bande". Sinon nous conseillons la démarche suivante.

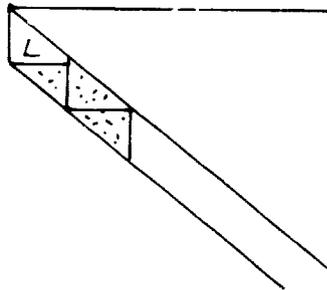
On donnera à NGMAX, par un premier passage, une valeur égale à 0. Le programme imprimera la taille de matrice et ne fera aucune exécution ; ce premier passage pourra servir de contrôle des données (ne pas mettre le mot CALCUL). (L'option MACRØ de COCO remplit également ce rôle).

Il se peut que la taille de la matrice soit très élevée : par exemple 300 000 ou plus. L'encombrement en mémoire centrale serait très élevé soit 2 400 K. Aussi l'utilisateur choisira d'exécuter son travail en mettant la matrice sur disque (Option DISQUE). Il est néanmoins nécessaire de prévoir une mémoire de travail (bien inférieure à la taille réelle de la matrice). On gagnera donc de la mémoire centrale, mais on perdra du temps à l'exécution.

Suivant la taille de mémoire de travail fournie par l'utilisateur (NGMAX), le programme partitionne de lui-même la matrice de rigidité en sous-matrices de tailles voisines de NGMAX.

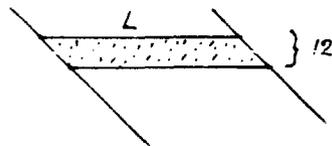
Deux découpages de la matrice sont possibles l'un que l'on appellera "lent" l'autre "Super lent".

Pour comprendre ces deux découpages considérons le type de matrice ci-dessous ; c'est une matrice bande dont la largeur maxima est L, cette quantité est imprimée par le programme.



Si l'utilisateur donne NGMAX de l'ordre de  $2L^2$  seule la zone hachurée est en mémoire centrale ; c'est le cas "lent".

Si cette condition n'est pas remplie le programme passera en mémoire "Super lente". (Il l'écrit sur listing). La taille minimum de NGMAX doit être de l'ordre  $12L$ . (Diagnostic du programme en cas d'impossibilité). L'économie de mémoire est considérable ; elle se paiera sur le temps d'exécution. Le type d'adressage de la matrice enlève au programme toute limitation qui proviendrait de largeur de bande trop élevée.



En résumé, l'utilisateur a donc la possibilité d'optimiser la taille de la mémoire centrale et le temps périphérique qui est fonction du nombre de sous-matrices.

## XXV - LIMITATIONS - CARACTERISTIQUES INFORMATIQUES

### "Limitations"

Il n'y a pas de limitation à priori quant au nombre de points ou d'éléments ; elle est en fait définie par la taille de la mémoire centrale disponible de l'ordinateur. Toutefois le nombre de sous-matrices doit être inférieur à 98 ; sinon un diagnostic arrêtera l'exécution. Cette limitation interdit l'utilisation de trop petites mémoires de travail qui conduirait à des temps périphériques très élevés, et compte tenu du système de facturation à Saclay à des coûts très élevés.

Une autre limitation réside dans le nombre de relations qui doit être inférieur à 50 ; cette limite pourrait être facilement remontée si le besoin s'en faisait sentir.

### "Cartes contrôle"

Elles comprennent :

- les cartes définissant le fichier programme ;
- les cartes GO FT. pour les disques et les bandes.

Rappelons les différents types de bandes ou disques.

- a) Bande (ou fichier) sur lequel le maillage est écrit

Ce n'est pas utile si le maillage est sur cartes.

- b) Bande (ou fichier) de sortie des résultats

Nécessaire seulement si l'on utilise l'option  
TRACER.

Remarque :

Ces deux fichiers peuvent avoir le même numéro, c'est-à-dire que le maillage et les résultats peuvent être sur la même bande magnétique, c'est une question de cartes de contrôle.

c) Disque de stockage de la matrice de rigidité (option VIBRATION)

En mémoire rapide c'est un disque normal. En mémoire lente c'est un disque d'accès direct.

d) Disque "accès direct" (option DISQUE)

Sur le disque se trouve la matrice de rigidité.

On utilise également un tel type de disque dans l'option DYNAMIQUE.

e) Disque accès direct pour le stockage de la matrice masse ou de la matrice de flambage.

Il n'est pas possible de donner un jeu complet de "carte-contrôle". Il peut être nécessaire de les adapter au problème traité ; en particulier les réservations de place sur les disques dépendent de la taille de la matrice de rigidité.

Les auteurs du programme fourniront ces cartes.

## DEFINITION DES FICHIERS NECESSAIRES

Cas statique : On a mis l'option PLASTIQUE M

- si on est en mémoire centrale pour la matrice de rigidité,  
M = numéro de fichier d'accès direct avec la place pour au moins 3 fois le nombre d'inconnues,
- en mémoire lente (ou super lente)  
M doit être identique au numéro de fichier déclaré dans DISQUE.

Cas dynamique : On a mis DYNAM PLAS M

- M est le numéro du disque dynamique comme en dynamique élastique,
- en mémoire rapide, il faudra un disque de numéro logique 1, différent de M, pouvant stocker au moins 5 fois le nombre d'inconnues.

Place nécessaire sur les fichiers accès direction stockage de matrice

- En règle générale, prévoir la place :
- de la matrice,
  - plus deux fois le nombre d'inconnues

- Cas particulier : problème dynamique pas à pas.  
Sur le disque NDIS (OPTION DISQUE)
- dynamique élastique - matrice
    - plus 4 fois le nombre d'inconnues
  - dynamique plastique - matrice
    - = - plus 5 fois le nombre d'inconnues.

Cas particulier : problème statique plastique  
Sur le disque MNDIS (option DISQUE) prévoir la  
place :

- de la matrice,
- plus 3 fois le nombre d'inconnues.

Calcul du nombre de cylindres nécessaires

Soit N le nombre de valeurs à stocker.

Sur les disques 2 314, la piste a une longueur de  
7200 octets, soit, et c'est fixé dans le programme, 830 valeurs  
sur piste.  $\frac{N}{830}$  donne le nombre de pistes nécessaires. Il y a  
20 pistes par cylindre, soit de l'ordre de 16 000 valeurs par  
cylindre.  $\frac{N}{16\ 000}$  donne le nombre de cylindres nécessaires.

Les disques actuels sont des "33/30". Les pistes  
sont environ 2 fois plus longues que celles des 2314. C'est donc  
de l'ordre de 30 000 valeurs qu'il y aura par cylindre.

XXVI - PLASTICITE

INTRODUCTION

Le modèle de plasticité permet d'effectuer soit des chargements monotones, soit cycliques en écrouissage isotrope pour le moment. Le module dynamique permet l'étude de problèmes dynamiques-plastiques (tels que des accidents sur un système de tuyauteries). Il est possible d'entrer plusieurs types de matériaux caractérisés par les courbes de traction qui peuvent être de forme quelconque.

I - RAPPEL SUR LE MODELE UTILISE EN PLASTICITE

La référence [1] donne la formulation utilisée dans le cas de tuyauteries. Nous rappelons ci-dessus l'essentiel des formulaires utilisés.

CONTRAINTE PLASTIQUE EQUIVALENTE D'UN TUBE

$$\sigma^* = \sqrt{\alpha_p^2 \sigma_p^2 + \alpha_n^2 \sigma_n^2 + \alpha_t^2 \sigma_t^2 + \alpha_f^2 \sigma_f^2}$$

Chargement	Contrainte (définition)	$\alpha_i$
Pression p	$\sigma_p = \frac{pD}{2e}$	$\alpha_p = \frac{\sqrt{3}}{2}$
Traction N (axiale)	$\sigma_n = \frac{N}{2\pi r e}$	$\alpha_n = 1$
Torsion de moment $M_t$	$\sigma_t = \frac{Mt}{\pi r^2 e}$	$\alpha_t = \frac{\sqrt{3}}{2}$
Torsion de moment $M_f$	$\sigma_t = \frac{Mf}{\pi r^2 e}$	$\alpha_f = \frac{\pi}{4} \gamma$

r rayon moyen du tube  
e épaisseur du tube  
R rayon de courbure du coude (fibre moyenne)  
 $\gamma = 1$  pour tubes droits

$$\gamma = \left\{ \begin{array}{ll} \gamma' = \frac{4}{3} \left( \frac{eR}{r^2} \right)^{-2/3} & \text{si } \gamma' > 1 \\ 1 & \text{si } \gamma' < 1 \end{array} \right\} \text{ pour coudes}$$

$\sigma^*$  est appelé contrainte équivalente et elle est comparée à la limite d'élasticité.

On écrira  $\sigma^* = f[\sigma_i]$ ,  $\sigma_i$  étant les contraintes généralisées.

Le type de formule ci-dessus s'applique bien dans le cas de tubes droits ou courbes. Dans le cas de T $\acute{e}$  ou coudes à 90°, éléments qui existent dans TEDEL, il est plus délicat de donner une telle formule. Aussi, dans la version actuelle, c'est la formule pour les tubes droits qui est utilisée par le T $\acute{e}$ , et pour les coudes à 90° c'est celle pour le coude rond équivalent qui est utilisée.

On remarquera que la pression intervient dans l'expression de la contrainte équivalente, et que  $\sigma_p$  est indépendant de l'état de déplacement ou de déformation de la tuyauterie ; ce qui n'est pas le cas pour les autres types de contraintes  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_f$  qui dépendent respectivement des déformations axiales, de la torsion et de la flexion. Une option de TEDEL (option PRESSION) permet de tenir compte de ce terme constant.

En ce qui concerne les poutres la même formulation est utilisée (bien entendu la pression n'existe pas). Tous les coefficients  $\alpha$  sont pris égaux à 1. La contrainte axiale a la même définition. Par contre les contraintes de torsion et flexion sont :

$$\sigma_t = \frac{Mt}{J_o/v} \quad \text{et} \quad \sigma_f = \frac{Mf}{I_o/v}$$

Les moments d'inertie sont déjà entrés dans le programme. Il faudra, en plus, entre :, les v équivalents pour les formes particulières de poutre (pour un I v est voisin de la distance à la fibre extrême).

## II - APERCU SUR LA METHODE DE CALCUL

A un accroissement des charges (ou du temps en dynamique) il correspond un accroissement des différentes contraintes  $\Delta\sigma_i^e$  qu'on calcule en supposant le matériau élastique.

On obtient l'expression de  $\sigma^*$  et on regarde alors si le critère est violé ou non.

Le principe de Hill (écoulement plastique normal à la surface  $\sigma^* = f(\sigma_i)$ ) fournit les déformations plastiques qui permettent de satisfaire au critère, c'est-à-dire ramener la valeur de  $\sigma^*$  sur la courbe de traction.

Les contraintes deviennent  $\sigma_i = \sigma_i^o + \Delta\sigma_i^e - \Delta\sigma_i^p$   
avec  $\Delta J_i^p = \Delta\varepsilon^* E_I \frac{\partial f}{\partial \sigma_i}$   $\Delta\varepsilon^*$  : augmentation de la déformation  
plastique équivalente.  
 $E_I$  : module d'Young

En fait les  $\frac{\partial f}{\partial \sigma_i}$ , puisque l'on est en accroissement fini doivent être compris au sens d'une valeur moyenne sur le pas afin d'assurer la stabilité du système ; c'est ce qui est fait dans TEDEL.

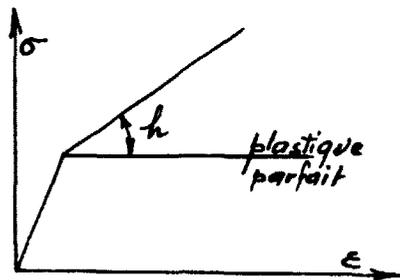
Les  $\Delta\sigma_i^o$  représentent des contraintes initiales qui sont injectées dans le calcul pour satisfaire à l'équation d'équilibre ; on peut alors recalculer les  $\Delta\sigma_i^e$ , et ainsi de sorte on constitue un système itératif par lequel il est nécessaire de se poser le problème de la convergence.

n représentant le numéro d'une itération, on appelle taux de convergence la quantité suivante :

$$\tau = \frac{\Delta\varepsilon_n^* - \Delta\varepsilon_{n-1}^*}{\Delta\varepsilon_{n-1}^* - \Delta\varepsilon_{n-2}^*}$$

Le système itératif converge si  $\tau < 1$

Lorsque  $\tau \geq 1$  il y a non convergence, c'est le cas lorsqu'on utilise un matériau dit plastique-parfait (schéma ci-



dessus). Dans ce dernier cas la contrainte, ne peut plus augmenter à partir d'une certaine déformation, et par conséquent à partir d'un certain chargement, toute augmentation des charges va conduire à la ruine de la structure. Ce chargement peut être appelé limite.

Par contre, il y aura toujours, convergence dans le cas où la pente  $h$  n'est pas nulle. On peut montrer, qu'à partir du moment où l'on entre dans le domaine des grandes déformations plastiques, que le taux de convergence est voisin de  $\tau = 1 - \frac{h}{E}$ , pour un rapport  $\frac{h}{E}$  faible. Ce qui revient à dire que  $\tau$  est voisin de 1, et qu'il faudra donc un grand nombre d'itérations pour converger. Un système d'accélération de convergence fonctionne dans TEDEL, toutes les 5 itérations, on accélère si nécessaire.

Il n'en est pas du tout de même en dynamique, où la convergence est beaucoup plus rapide. Les pas de temps étant relativement faibles, 3 itérations par pas sont suffisantes en général ; cela étant dû, aux forces d'inertie qui n'existent pas dans le cas statique.

Les moments de flexion, en général, varient le long d'un élément, et par conséquent la valeur de la contrainte équivalente ; en toute rigueur il faudrait donc calculer les  $\sigma^*$  et les écoulements plastiques en tout point à l'intérieur de l'élément. Nous avons choisi de ne le faire qu'aux extrémités de l'élément, ce qui entraîne l'approximation suivante : les déformations plastiques varient linéairement le long d'un élément. Il faudra donc soigner quelque peu le maillage par rapport au

cas statique pour lequel la taille des éléments (sauf dans les coudes) n'a pas d'importance. Cette approximation est en fait peu gênante dans la plupart des cas. En effet la plastification aura lieu préférentiellement dans les coudes, là où justement TEDEL impose un découpage fin.

III - FORME DES DONNEES (voir exemples)

Il s'agira :

- de préciser que l'on travaille en plastique
- dans le cas des poutres d'entrer les valeurs de  $v$
- d'entrer les courbes de traction
- de définir les chargements et les incréments correspondants
- le nombre maximum d'itérations et la précision souhaitée.

A) Derrière la carte titre mettre

Cas statique PLASTIQUE M

M est un numéro de fichier (voir signification dans le § concernant les fichiers)

Cas dynamique DYNAM PLAS N

N numéro de fichier  $\equiv$  à celui du dynamique normal.

B) Si l'option POUTRE a été utilisée, derrière les données des inerties, ou des vecteurs mettre pour une :

- poutre de révolution : la valeur de  $v$  si  $v = 0$  pas de plasticité due à la flexion ou torsion.
- poutre non de révolution : mettre  $v_1$   $v_2$   $v_3$  respectivement pour les flexions, et  $v_3$  pour la torsion. Si l'un des trois est nul il n'y aura pas de plasticité en flexion ou torsion.

C) Courbes de traction

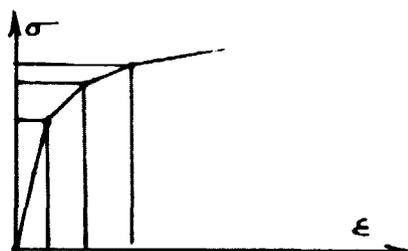
Derrière les données de MATERIAU  
mettre :

TRACTION

NMAT nombre de zones de matériau  $< 5$

NCOUR nombre de points sur les courbes de traction  $\leq 10$ .

NMAT fois { NCOUR fois les couples  $(\sigma, \epsilon)$



Si NMAT > 1 mettre les données suivantes :

NZONE nombre de zones de description

NZONE fois { KTYP numéro de la courbe de traction dans l'ordre ci-dessus  
I1 PAS I2 IPAS

KTYP est affecté aux éléments I1 à I2 inclus par pas de IPAS.

Les éléments non affectés à une courbe de traction particulière sont automatiquement affectés à la première courbe de traction.

Remarques :

- le premier couple  $\sigma, \epsilon$  définit la limite d'élasticité en contrainte et déformation  $\sigma_1 = Re$  et  $\epsilon_1 = \frac{Re}{E}$ ,

- le programme interpole de façon parabolique dans les courbes, ce qui permet une description lâche. Pour éviter une extrapolation hasardeuse, si on dépasse en déformation la valeur du dernier  $\epsilon$ , il est recommandé de terminer les courbes par un palier ; c'est-à-dire au moins 3 valeurs de  $\sigma$  identiques.

D) Définition des incréments de charge

- en dynamique ils sont automatiquement définis par la directive EVOL qui est donc à utiliser comme en dynamique élastique.

- en plastique statique après la donnée des charges mettre :

EVOL NZONE

NZONE fois le couple (M, Δ) M nombre de pas de largeur Δ

puis N I1 I2 I3 numéro des pas de sortie cette  
Nfois séquence est identique à celle de EVOL dynamique élastique.

puis N1 N2 0 NMA PREC

N<sub>1</sub> N<sub>2</sub> deux numéros d'éléments pour le contrôle des itérations.

0 mettre la valeur 0 dans le programme

NMAX nombre maximum d'itérations ; les itérations s'arrêteront et on passera au pas suivant si l'on atteint NMAX.

NMAX doit être de préférence différent d'un multiple de 5, à cause d'accélération de convergence.

PREC : valeur de la précision

On n'arrête les itérations quand :

$$\text{Max}_{\text{sur la structure}} \left[ \frac{\Delta \varepsilon^{*n-1} - \Delta \varepsilon^{*n}}{n} \right] < \text{PREC}$$

C'est un critère assez sévère, on contrôlera toutefois la convergence à l'aide du taux de convergence I, imprimé pour les éléments N<sub>1</sub> et N<sub>2</sub>. A chaque itération on imprimera,

pour ces éléments seulement :

$$\sigma^{*n} \text{ calculé} \quad \sigma^{*n} \text{ courbe} \quad \Delta \epsilon^{*n} \left| \frac{\Delta \epsilon^{*n} - \Delta \epsilon^{*n-1}}{\Delta \epsilon^{*n}} \right| \tau$$

#### E) Chargements complexes

- la pression est constante, et on l'introduira dans la première directive CHARGE sous la forme PRESSION puis la valeur de la pression.

- les charges thermiques doivent être introduites dans la première directive CHARGE.

- le poids et les chargements répartis doivent être introduits dans la première directive CHARGE ; en effet ils produisent des moments initiaux qui jouent comme des corrections suivant la finesse du maillage.

- les calculs avec charges thermiques en dynamique ne sont pas possibles ; en fait dans le calcul de la contrainte axiale, et dans celui des moments on négligera les contraintes initiales  $E \alpha \theta$  ou  $E I w''_0$  si l'on a utilisé l'option COURBURE.

EXEMPLE

1) Cas statique

TEDEL-COUDE PHENIX

PLAS 1

19 1500 20 0 0  
GEOM QUEL 5

On est en mémoire centrale pour la matrice ; il faudra un disque d'accès direct avec au moins la place pour 3 fois le nombre d'inconnues.

On aurait pu faire en mémoire lente

PLAS 1 19 500 20 0 0  
DISQUE 1

TUYAU ASME

MATER NOM 1 19 19500 7000

TRACTION 1 8 10.1 0.00052 19.2 0.00123...  
.....  
34.8 0.1 34.8 0.2 34.8 0.3

CHAR

(PRESSION p) éventuellement

FORC

POIDS

EVOL 1 5 3  
5 1 2 3 4 5  
18 19 0 23 I.E-3

5 pas de 3 on ira jusqu'à 15 fois le chargement défini ci-dessus.

DEPLA

TRACER 10 éventuellement

CALCUL

2) Dynamique - Mémoire rapide

TEDEL-ACCIDENT

DYNAM PLAS 2

19 1500 20 0 0

mémoire rapide

GEOM....

MATER

TRACTION

CHAR

(PRESSION)

FORC

EVOL	0.001	0.	1	1.	10	1.	100						
11	1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	100		
18	19	0	3	I.E-3									

} mêmes données dynamique-élastiques.

DEPLA

CALCUL

FIN

Il faudra une carte GOFT01 en plus

3) Dynamique - Mémoire lente

TEDEL-ACCIDENT

DYNAM PLAS 2

19 500 20 0 0 DISQUE 1

ECROUISSAGE CINEMATIQUE - THERMOPLASTICITE - FLUAGE -

Ecrouisseage cinématique -

On utilise le modèle de Ziegler appliqué aux contraintes généralisées  $\sigma_2$

$\sigma^* = f(\sigma_2 - \alpha_1)$  où les  $\alpha_1$  représentent les "coordonnées du centre de la surface".

Seuls les  $\sigma_2 - \alpha_1$  sont calculés et imprimés.

Pour utiliser cette option on mettra, derrière le mot PLASTIQUE le mot CINEMATIQUE

Exemple

```
TITRE
PLAS  CINE  1
10   500  T1  0  0
```

Thermoplasticité -

Les propriétés des matériaux (courbes de traction) dépendent de la température dont il faudra définir l'évolution.

Dans TEDEL on suppose que le module d'Young et le coefficient de dilatation thermique sont indépendants de la température.

La variation des propriétés avec la température sera introduite par l'utilisateur dans un sous-programme particulier. On devra y définir :

$\sigma^* = g (\Sigma^*, \theta, \dots)$        $\Sigma^*$  déformation équivalente cumulée  
 $\theta$  température

et

$$\frac{\partial \sigma^*}{\partial \Sigma^*} = h (\Sigma^*, \theta)$$

Le modèle choisi portera un numéro : NUMODE.

Lorsque NUMODE = 0 on utilisera les courbes indépendantes de la température données dans MATER.

On peut utiliser indifféremment l'écroutissage isotrope ou cinématique.

#### Forme des données

Derrière le mot PLASTIQUE mettre

THERMIQUE puis

PROPRIETES et NUMODE

Exemple

PLAS    CINE  
THER    PROP    2  
1 ....

Dans la directive CHARGE mettre

THERMIQUE puis CARTE

NBTHER    numéro logique de bande magnétique ou disque (par pas prévoir une place en mots égale au nombre d'inconnues plus 3 fois le nombre d'éléments)

TINI    température initiale

TREF    température de référence ; les propriétés dépendent de  $\theta - TREF$

S'il n'y a pas d'autres données, cela suppose que la bande magnétique a déjà été constituée .

Sinon on mettra

PAS            IFIN            numéro du pas où l'on définit la carte  
de température ( $\theta$ )

ZNONE

NZONE fois	}	I1	I2	$\theta$
		I1	PAS	IPAS

puis retour sur le mot PAS jusqu'à épuisement des données.

- NOTA : - les éléments non définis dans PAS restent à la température initiale
- entre deux pas définis par IFIN les températures sont interpolées linéairement.

### Fluage

Dans un subroutine particulier l'utilisateur a la possibilité, par matériau, de programmer n'importe quelle loi de fluage sous la forme

$$\dot{\epsilon}^* = \psi(\epsilon^*, \sigma^*, \theta, t, \text{dose}, \text{flux} \dots)$$

- $\dot{\epsilon}^*$  vitesse de fluage
- $\epsilon^*$  déformation équivalente
- $\sigma^*$  contrainte équivalente
- $\theta$  température
- t temps

Forme des données

derrière le mot PLAS mettre

FLUAGE      PROPRIETES      NUMODE      (numéro du modèle)

dans la direction CHARGE mettre

TEMPS      I       $t_I$       J       $t_J$

autant de fois que nécessaire

(I numéro du pas,  $t_I$  temps au pas I).

Exemple

Titre

PLAS      FLUAG.      PROP 2      THER (éventuellement) 1

-----

-----

CHARGE

-----

TEMPS 1      0.      10      1.

-----

-----

NOTA :

- la plasticité instantanée n'a lieu que dans les pas de temps où le temps est constant ; la loi de plasticité  $\sigma^* = g(\Sigma^*, \theta \dots)$  doit être précisée dans le même sous-programme où l'on définit la vitesse de fluage.
- le fluage n'a lieu que dans le pas de temps où le temps varie
- les temps aux pas non précisés dans TEMPS sont obtenus par interpolation linéaire.

## XXVII - ELEMENTS DE COQUE

Il a paru intéressant d'introduire dans TEDEL un élément de coque triangulaire (le même que celui de TRICO) pour certaines applications.



La définition géométrique de cet élément se fait dans le fichier COCO.

Il est nécessaire de donner les épaisseurs dans GEOM par la procédure EPAIS ZONE

NZONE    { I1 I2 ou I1 PAS IPAS I2  
fois        } e valeur de l'épaisseur

Dans MATER pour ces éléments on donnera le coefficient de Poisson au lieu de G

Seules les charges concentrées sont possibles sur ce type d'élément.

Il n'y a pas possibilité de matrice masse ou de matrice de flambage pour cet élément.

Cet élément n'est à utiliser qu'en élastique pour lequel on sort les moments et contraintes de la même façon que dans TRICO [4\_].

La contrainte équivalente qui est prise dans la directive VERIFICATION est :

$$\sigma^* = \sqrt{\sigma_m^2 + \left(\frac{4M}{h^2}\right)^2} \quad \text{où } \sigma_m^2 \text{ et } M^2 \text{ représentent les}$$

invariants du deuxième ordre de la membrane et des moments.

XXVIII - GRANDS DEPLACEMENTS

L'équation d'équilibre est écrite sur le corps déformé.

Une technique itérative mêle les itérations géométriques et celles dues à la plasticité (s'il y a lieu).

L'écroûissage cinématique n'est pas possible dans cette option.

Les éléments de coque, s'il y en a, restent en petits déplacements.

Forme des données

derrière le mot PLASTIQUE mettre NONLINEAIRE

Exemple

```
Titre
PLAS NONL 1
500
-----
MATER
-----
CHAR
-----
EVL
-----
CALCUL
FIN.
```

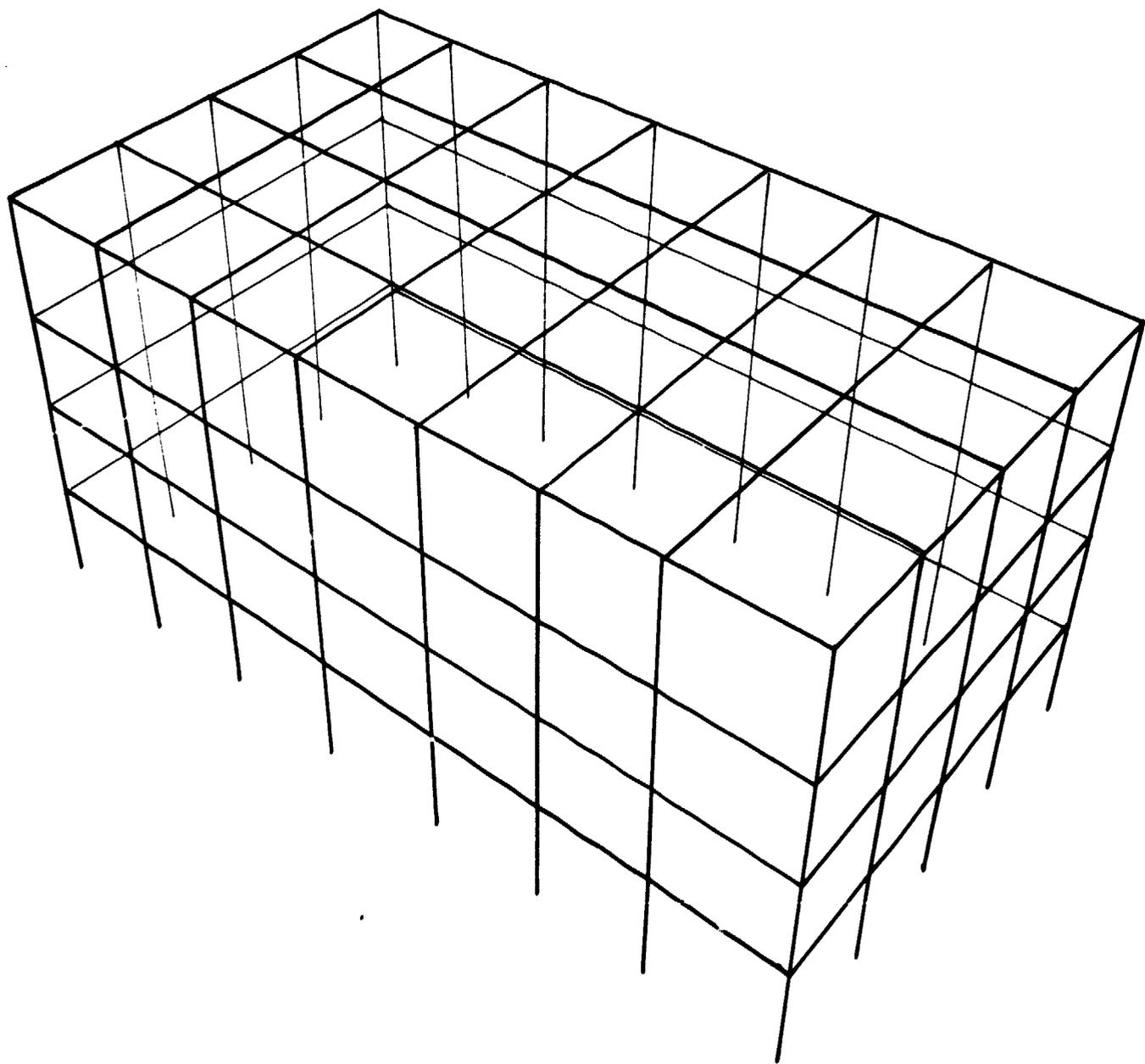
REFERENCES

- 1           Système CEASEMT- Programme COCO   EMT/76-20  
Programme de maillage dans l'espace et dans le plan  
par Alain HOFFMANN - Notice d'utilisation -  
EMT/
- 2           ASME
- 3           R. ROCHE  
  
Modèle simple pour le calcul plastique d'une tuyauterie  
EMT/74-47
- 4           Alain HOFFMANN et F. JEANPIERRE  
  
Système CEASEMT- Programme TRICO  
Notice d'utilisation Janvier 1976-   EMT/76-11
- 5           F. AURIOL, F. JEANPIERRE, B. GASC, S. GOLDSTEIN, A. HOFFMANN
- \*           Système CEASEMT - Fonctions "ESPACE" "TEMPS" "VISU "  
Notice d'utilisation Mars 1976 - EMT 76/29



EXEMPLES





EXEMPLE 1

Volute EL4 - Calcul en poutres

30 500 31 0 1

GEOM LINE 3

11 0 0 0 0 0 400

11 0 0 400 0 325.5 400

11 0 325.5 400 0 325.5 160

POUTRE NON

1 10 1863 543191 543191 10000 1 0 0

11 20 1490 598954 598954 10000 1 0 0

21 30 1680 561115 581115 10000 1 0 0

MATER NON 1 30 21000 10000

CHAR

FORC

2 1 69.6

2 2 PAS 1 10 139.6

2 11 69.6

3 11 -77.2

3 21 -77.2

3 12 PAS 1 20 -154.5

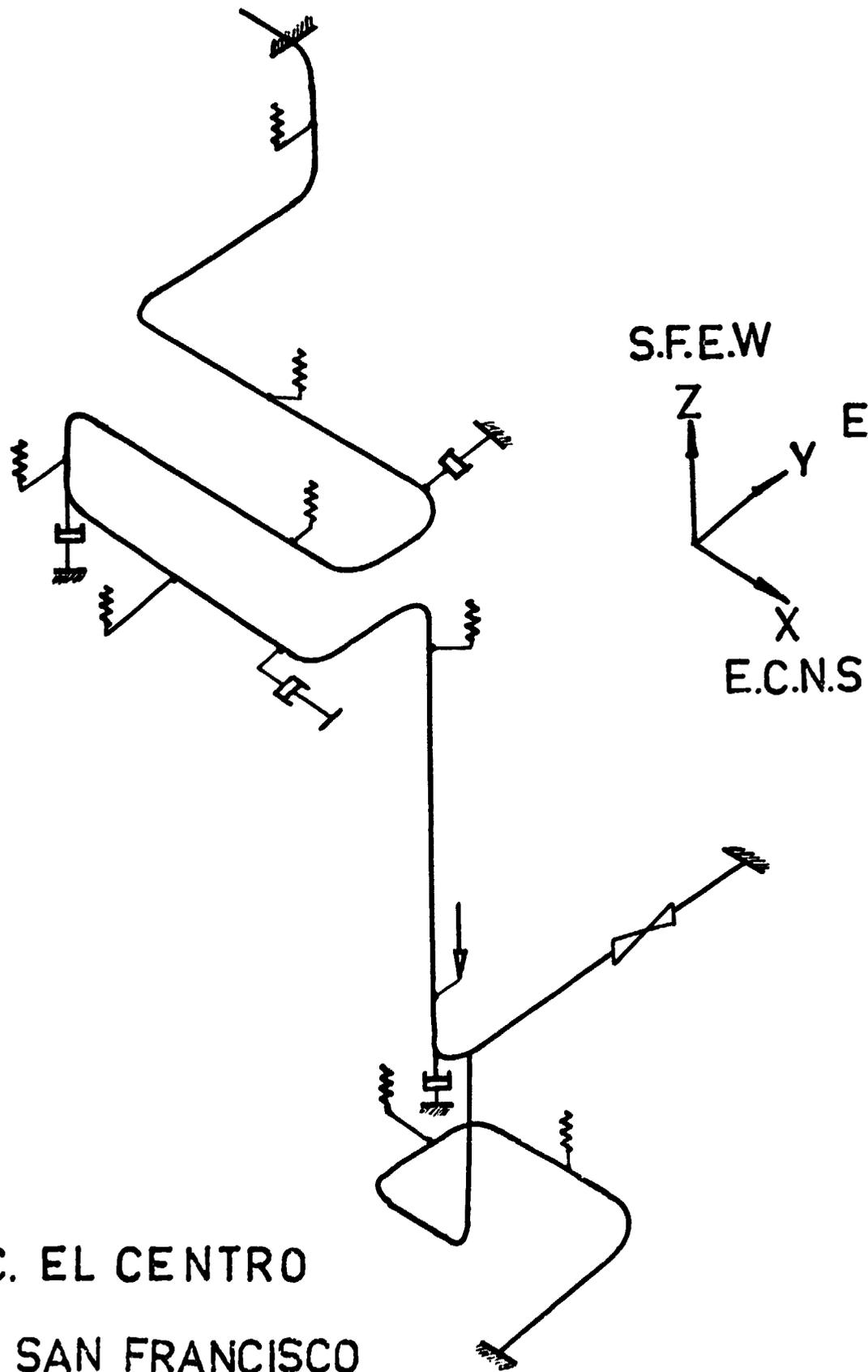
DEPL 7 0

APPUI 31 3 222 66.4 31. 4 8157694

CALCUL

FIN

On travail ici entièrement en mémoire rapide.



EXEMPLE II

Phénix - Séisme - Tuyauterie

215            22000            217    0   6

GEOM            QUEL            5

(Paquet COCO)

TUYAU            ASME

1    7    1    0.2545    0.0075    0    NON

.....

8    17    2    0.255    0.0105    0.762    NON

.....

RELATION

1    1    1    149    0    1.    1    158    0

.....

.....

PERMUT

MATER NON            1    215    1.76E11            0.678E11

MASSE 1    215    27900.

ADDITION

3    153    991    1 154    1982.    1    155    991    TERM

APPUI

19    3    118300

.....

DEPLA

7    8    0

.....

VERIF            AS: E    1    1

CALCUL            FIN

STATIQUE            0.15G    EN    Y

CHAR            ACCE    2    1.47

SUITE

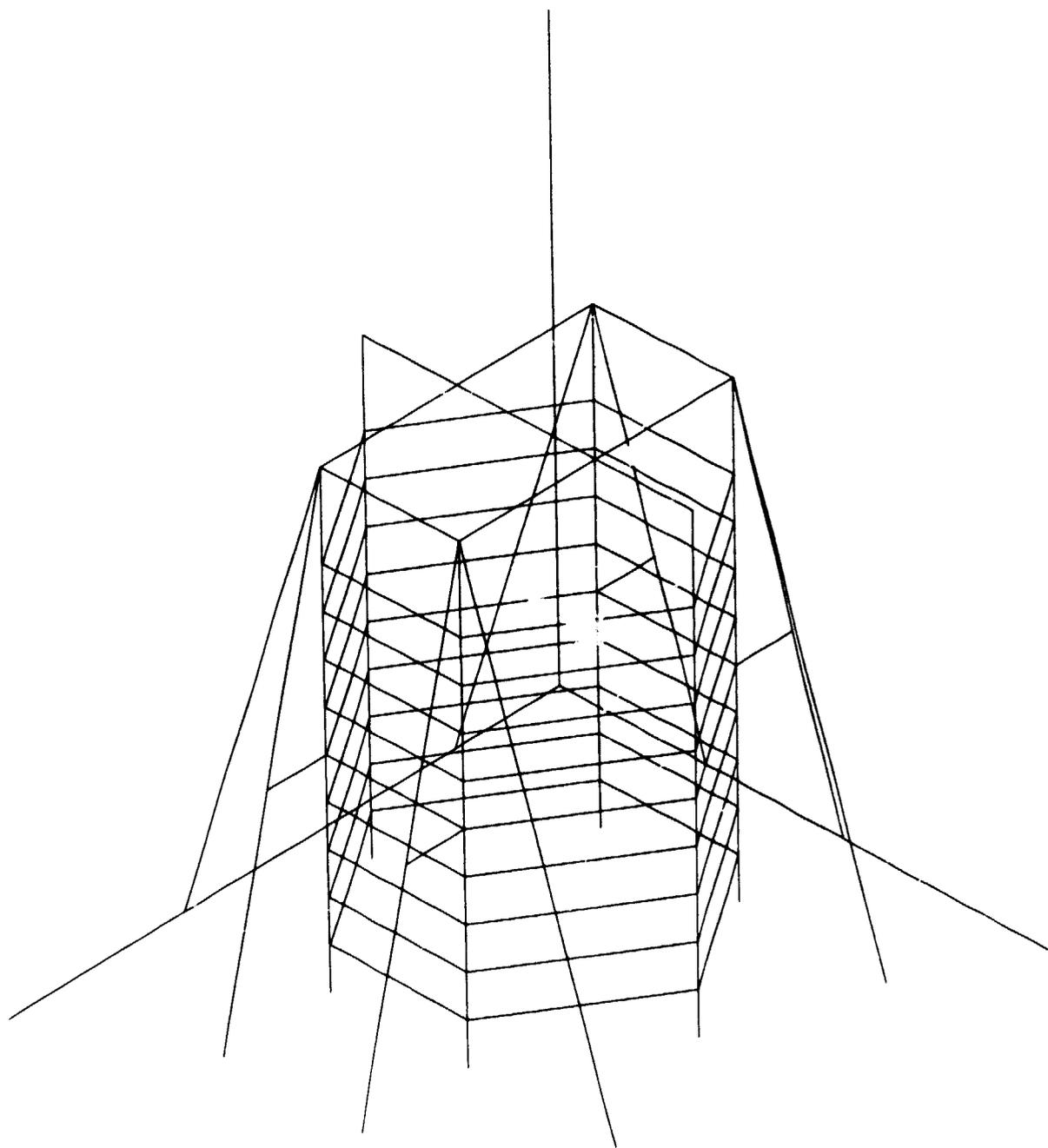
FIN

STATIQUE            0.156    en    -Z

CHAR            ACCE    3    -1.47

SUITE

FIN



EXEMPLE III

ETUDE DE FLAMBAGE - BARRES ARTICULEES

130 15000 58 0 10 DISQ 1

NOIMPRIM

GEOM QUEL 5

(Paquet coco)

POUTRE NON

1 10 5,9.E-03 8.E-6 1.36-5 9.3E-7 0. 0. 1

Définition des poutres

RELATION

7 2 1 5 5 0.9781 1 3 5 - 0.2079 2 3

7 2 2 5 5 0.2079 1 3 5 0.9781 2 3 5

7 1 6 5 5 1. 6 3 5

PERMUT

ARTI

DEBUT MOYEN Y 2 3 4 5

DEBUT MOME X Y Z 121 123 125

MATER TEMP 1 130 2.1E+11 0.8E+11

1.2E-5

CHAR FORC

3 45 1.E-4

DEPLA 3 46 0. 1 44 PAS 1 46 0

FLAMBAGE 2 3

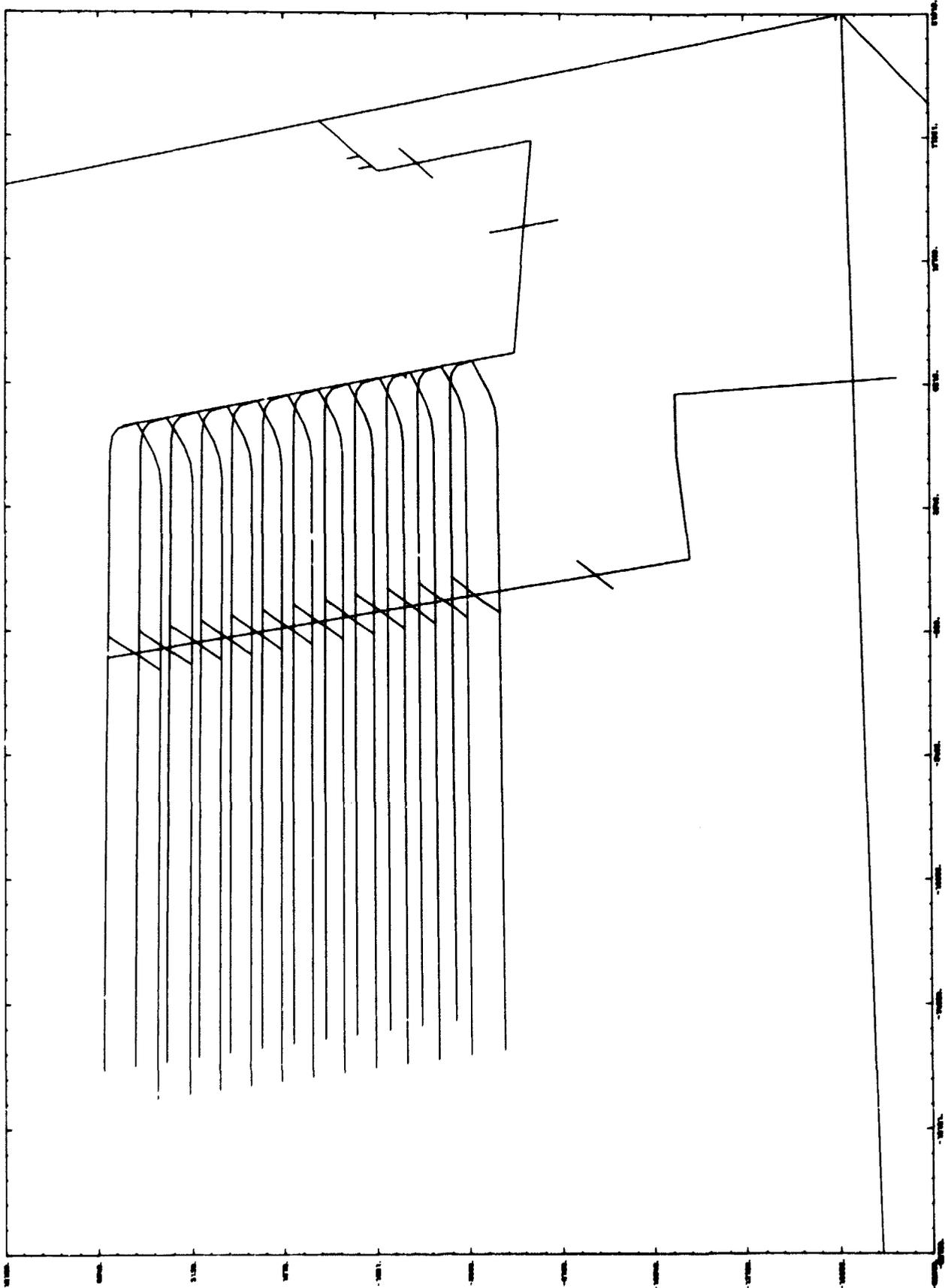
CALC NOCONT

VIBR -1 3 1 0.1 0

FIN

Dans cette étude il y a 3 disques 1, 2, 3

NOCONT avant VIBR indique qu'il n'y a pas de calcul de contrainte sur la déformée.



#### EXEMPLE IV

RECHERCHE DE FREQUENCE AVEC MATRICE MASSE

500 4000 200 0 10 DISQ 1

GEOM

MATER....

DEPLA....

MASSE MATRI 10 1 500 7.8 E-10 (ADDI) TERMINE

NOCONT

VIBRATION -1 10 1 0. 0.

FIN

2 fichiers sont nécessaires 1 et 10

On mettra le même numéro de fichier dans les directives MASSE et VIBRATION lorsque NF = 1 dans la directive VIBRATION NOCONT car on ne veut pas de calcul de contraintes sur la déformée.

EXEMPLE V

Titre  
 100 3000 200 0 1 DISQUE  
 GEOM...  
 RELATION

MATER  
 CHAR  
 DEPLA

CALCUL  
 SAUVER 11  
 FIN

Sauvetage de matrice in-  
 versée

Titre  
 .....

GEOM  
 RELATION  
 RESTITUER 11  
 MATER  
 CHAR

SUITE  
 FIN

Matrice in-  
 versée resti-  
 tuée - pas de  
 déplacements  
 imposés  
 Emploi du  
 mot SUITE

Titre  
 .....

GEOM  
 MATER  
 SAUVER 11  
 CHAR  
 DEPLA

CALCUL  
 FIN

Sauvetage de ma-  
 trice assemblée  
 non inversée.

EXEMPLE VI

```

Titre
COMPLEX 4 2 100           disque 4, 2 chargements
DYNAM 2                   supplémentaires à lire
400. 10000 200 0 1
DISQ i
GEOM....
.....
.....
MATER...
CHARGE..
.....
EVOL 0.002 0. 3..... 40 } description du premier
7 1 1 5 10 15 20 30 40 } chargement
.....
DEPLA
MASSE MATRI 3 .....
.....
CALCUL
REPAR.....
FORC....
EVOL 0.002 1. 4..... 40 } description du premier
7 1 5 ..... } chargement supplémentaire
FIN
FORC....
FORC.....
EVOL 0.002 0. 5..... 40 } description du 2e charge-
7 1 5 ..... } ment supplémentaire
FIN
FIN

```

