

# **CALCULS MECANIQUES - II**

## **NON-LINEAIRE STATIQUE**

### **EXEMPLES**

**Pour faire une reprise avec PASAPAS**

**Frottement élastique externe**

**Frottement élastique interne**

**Thermo-élasticité linéaire couplée**

**Thermo-élasticité non-linéaire**

**Elasto-plasticité**

**Thermo-élasto-plasticité**

**Fluage**

**Grands déplacements**

## **DYNAMIQUE LINEAIRE**

### **INTEGRATION DIRECTE**

### **SUPERPOSITION MODALE**

### **ANALYSE SPECTRALE**

#### **EXEMPLES**

**intégration directe**

**superposition modale**

**analyse spectrale**

## **DYNAMIQUE NON-LINEAIRE**

### **EXEMPLES**

**Philippe PASQUET**

**16/09/1999**

**©php**

# TABLE DES MATIERES

<b>AVERTISSEMENT</b>	<b>5</b>
<b>1. SYSTEMES D'UNITES EN MECANIQUE DES STRUCTURES</b>	<b>7</b>
<b>2. QUANTITES CARACTERISTIQUES EN MECANIQUE DES STRUCTURES</b>	<b>8</b>
<b>3. QUELQUES VALEURS CARACTERISTIQUES EN MECANIQUE DES STRUCTURES</b>	<b>10</b>
<b>4. CALCULS STATIQUES NON LINEAIRES MECANIKES</b>	<b>11</b>
<b>4.1 MODELE EN MECANIQUE NON LINEAIRE</b>	<b>11</b>
<b>4.2 CONDITIONS AUX LIMITES</b>	<b>13</b>
<b>4.3 MATERIAU EN MECANIQUE NON LINEAIRE</b>	<b>14</b>
p11) Modèle élasto-PLASTIQUE à écrouissage isotrope (Von Mises)	14
p12) Modèle élasto-PLASTIQUE PARFAIT (Von Mises)	14
p13) Modèle élasto-PLASTIQUE à écrouissage CINEMATIQUE (Von Mises)	15
p14) Modèle élasto-PLASTIQUE DRUCKER PARFAIT	15
p15) Modèle élasto-PLASTIQUE DRUCKER PRAGER	15
p16) Modèle élasto-PLASTIQUE CHABOCHE1 (Chaboche à un centre et écrouissage isotrope)	15
p17) Modèle élasto-PLASTIQUE CHABOCHE2 (Chaboche à deux centres et écrouissage isotrope)	15
p18) Modèle élasto-PLASTIQUE ENDOMMAGEABLE (Lemaitre-Chaboche)	16
p19) Modèle PLASTIQUE de COULOMB	16
p110) Modèle PLASTIQUE de JOINT_DILATANT	16
p111) Modèle PLASTIQUE de AMADEI	16
p112) Modèle PLASTIQUE UBIQUITOUS	17
p113) Modèle PLASTIQUE CAM_CLAY	17
en1) Modèle ENDOMMAGEMENT UNILATERAL	17
fr1) Modèle FROTTEMENT COULOMB	18
be1) Modèle élasto-PLASTIQUE BETON (en contraintes planes)	18
be2) Modèle élasto-PLASTIQUE BETON (en axisymétrie et tridimensionnel)	18
be3) Modèle BETON_UNI	18
be4) Modèle OTTOSEN	19
be5) Modèle BETON_INSA	19
be6) Modèle BETOCYCL	20
fl1) Modèle FLUAGE RCCMR_304	20
fl2) Modèle FLUAGE NORTON (strain hardening ou écrouissage par la déformation)	21
fl3) Modèle FLUAGE BLACKBURN	21
fl4) Modèle FLUAGE BLACKBURN_2	22
fl5) Modèle FLUAGE RCCMR_316	22
fl6) Modèle FLUAGE LEMAITRE	23
fl7) Modèle FLUAGE CERAMIQUE	23
fl8) Modèle FLUAGE POLYNOMIAL	24
vp1) Modèle VISCOPLASTIQUE PARFAIT	24
vp2) Modèle VISCOPLASTIQUE DDI	24
vp3) Modèle VISCOPLASTIQUE GUIONNET	24
<b>4.4 CHARGEMENT EN MECANIQUE NON LINEAIRE</b>	<b>25</b>

<b>4.5 RESOLUTION EN MECANIQUE NON LINEAIRE</b>	<b>26</b>
<b>5. EXEMPLES STATIQUES NON LINEAIRES MECANIQUES</b>	<b>29</b>
5.1 POUR FAIRE UNE REPRISE AVEC PASAPAS	29
5.2 FROTTEMENT ELASTIQUE EXTERNE	30
5.3 FROTTEMENT ELASTIQUE INTERNE	32
5.4 THERMO-ELASTICITE LINEAIRE COUPLEE	34
5.5 THERMO-ELASTICITE NON LINEAIRE	36
5.6 ELASTO-PLASTICITE	37
5.7 THERMO-ELASTO-PLASTICITE	38
5.8 THERMO-ELASTO-PLASTICITE COUPLEE	40
5.9 FLUAGE	43
5.10 GRANDS DEPLACEMENTS	44
5.11 CAS DES ELEMENTS JOINTS	45
5.12 Consolidation linéaire des sols	47
5.13 CONSOLIDATION ELASTOPLASTIQUE DES SOLS	49
<b>6. CALCULS DYNAMIQUES LINEAIRES MECANIQUES</b>	<b>50</b>
6.1 INTEGRATION DIRECTE	50
6.2 SUPERPOSITION MODALE	55
6.3 METHODE SPECTRALE	58
<b>7. EXEMPLES DYNAMIQUES LINEAIRES MECANIQUES</b>	<b>64</b>
7.1 INTEGRATION DIRECTE	64
a) Pour faire une reprise avec PASAPAS	64
b)	64
7.2 SUPERPOSITION MODALE	65
a) Influence des modes propres	65
7.3 ANALYSE SPECTRALE	66
a) Influence des modes propres	66
<b>8. CALCULS DYNAMIQUES NON LINEAIRES MECANIQUES</b>	<b>67</b>
<b>9. EXEMPLES DYNAMIQUES NON LINEAIRES MECANIQUES</b>	<b>75</b>
9.1 POUR FAIRE UNE REPRISE AVEC PASAPAS	75

<b>10. TYPE D'OBJETS CREES</b>	<b>76</b>
<b>11. ESSAI DE RECENSEMENT DES VALEURS PAR DEFAUT</b>	<b>78</b>
<b>12. REFERENCES GENERALES</b>	<b>79</b>
<b>13. ANNEXE THEORIQUE</b>	<b>81</b>
13.1 ALGORITHME DE FU-DEVOGELAERE	81
13.2 ALGORITHME IMPLICITE DE NEWMARK	82
13.3 RECOMBINAISON QUADRATIQUE COMPLETE (CQC)	83
13.4 RECOMBINAISON QUADRATIQUE SIMPLE (SRSS)	84
13.5 RECOMBINAISON QUADRATIQUE DIX POUR CENT	85
13.6 ALGORITHME EXPLICITE	86
<b>14. REPERES BIOGRAPHIQUES</b>	<b>87</b>
<b>15. INDEX</b>	<b>89</b>

## AVERTISSEMENT

Le volume Mécanique des Structures (en deux tomes) fait partie d'un ensemble comprenant les titres suivants

- Présentation du Langage
- Maillage
- Vérification des données
- Thermique des Structures
- Mécanique des Structures - I
- Mécanique des Structures - II**
- Mécanique des Fluides
- Electromagnétisme
- Post-Traitements

Nous avons repris dans ce volume, l'ensemble des opérateurs, procédures, directives permettant les calculs mécaniques. Ils ne sont pas décrits dans leur intégralité mais dans leur acception la plus couramment utilisée. Le lecteur intéressé peut, pour obtenir l'intégralité des possibilités d'un opérateur, faire **INFO** nom ; dans CASTEM2000<sup>®</sup>. Dans la description qui suit, nous considérons que le maillage est construit et nous nous arrêtons à l'opérateur **RESO** (dans le tome 1) ou à la procédure **PASAPAS** (dans le tome 2) . En particulier, on ne calcule pas de contraintes mises à part celles qui sont calculées dans PASAPAS. Pour ces calculs et tous les dépouillements postérieurs, on se reportera au volume Post-Traitements.

Nous avons aussi essayé de faire un peu plus qu'un guide d'utilisation. Le lecteur s'en rendra, nous l'espérons, compte tout au long de ce volume et en particulier dans les premiers et derniers chapitres.

Ce volume, comme l'ensemble de ce manuel, est nécessairement incomplet et malheureusement, il n'est pas exempt d'erreurs. Nous serions particulièrement reconnaissants aux lecteurs qui nous signaleront toute imperfection.

Nous avons déterminé quatre classes de problèmes :

- le problème statique linéaire incluant vibration, flambement et contact unilatéral mais aussi les problèmes standards dont le couplage thermo-mécanique et le couplage magnéto-mécanique,
- le problème statique non linéaire où l'on retrouve traditionnellement les non linéarités de comportement (très développées dans CASTEM2000<sup>®</sup>), les non linéarités de contact (incluant le frottement) et les non linéarités géométriques,
- le problème dynamique linéaire avec ses trois variantes habituelles : intégration directe, superposition modale (permettant dans CASTEM2000<sup>®</sup> un certain nombre de non linéarités de contact) et analyse spectrale,
- le problème dynamique non linéaire traité de manière implicite pour toutes les géométries et explicite pour les géométries bidimensionnelles.

A ces quatre classes, il convient d'ajouter les problèmes de diffusion hydraulique dont on trouvera un autre traitement dans le volume Thermique des Structures et plus généralement de consolidation (couplage contraintes-diffusion dans les sols saturés).

Chacune des classes comportent plusieurs exemples par sous-type afin d'éviter tout mélange de difficultés. L'utilisateur prendra rapidement l'habitude de coupler les difficultés et se rendra compte de la relative facilité à le faire.

Nous n'avons pas repris de manière systématique la description des erreurs possibles dans CASTEM2000<sup>®</sup>. Les erreurs de syntaxe sont bien contrôlées et le diagnostic est relativement clair sauf dans le cas où le point virgule (;) a été omis, dans le cas où il peut y avoir confusion entre deux objets de même type : l'exemple typique est celui de l'opérateur

**FORCe.** ou dans le cas où il y a confusion entre un nom d'objet et un nom d'opérateur. Les erreurs les plus sournoises sont la conséquence de l'ouverture et de la permissivité de CASTEM2000<sup>®</sup> qui permet d'enchaîner toutes les opérations : dans ce domaine la plus courante consiste à ne pas retrancher les contraintes dues aux déformations initiales du résultat de l'opérateur **SIGMa** en particulier dans le cas thermo-mécanique où la contrainte réelle est **SIGMa - THETA** ou à ne pas ajouter les contraintes initiales.

Il y a très peu de valeurs par défaut dans CASTEM2000<sup>®</sup> : dans la suite, on trouvera un essai de recensement (Voir page 78) de ces valeurs. Pour attirer l'attention du lecteur-utilisateur signalons le **MODEle** (directive **OPTion**), le type d'élément fini (opérateur **MODEle**) et les conditions de blocages (opérateur **DEPImposé**), certains paramètres de la procédure **PASAPAS** (en particulier les valeurs initiales et le type de calcul désiré), l'épaisseur des éléments en contraintes planes.

Rappelons enfin que tout nom d'objets (choisi par l'utilisateur) doit être différent d'un nom d'opérateur (imposé par CASTEM2000<sup>®</sup> -sauf directive **MOT-**). Pour ne pas être handicapé par cette restriction, on peut mettre les noms d'opérateurs entre ‘’.

La description des opérateurs est cohérente avec la version 98.

## 1. SYSTEMES D'UNITES EN MECANIQUE DES STRUCTURES

On définit les systèmes d'unités cohérents à partir de l'unité de longueur (ou déplacement) et de l'unité de module d'Young (ou contraintes)

unité	SI	SA	SB	SC	SD	SE	SU
Young	Pa (N.m <sup>-2</sup> )	kgf.m <sup>-2</sup>	tf.m <sup>-2</sup>	kgf.mm <sup>-2</sup> (hbar)	N.mm <sup>-2</sup> (MPa)	kgf.cm <sup>-2</sup> (bar)	psi
longueur	m	m	m	mm	mm	cm	in

Dans le tableau suivant, on a les facteurs (coef) entre SI et Sx tels que: SI = coef x Sx

	SI	SA	SB	SC	SD	SE	SU
accélération	m.s <sup>-2</sup>	1	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	39.370 in.s <sup>-2</sup>
accélération angulaire	rad.s <sup>-2</sup>	1	1	1	1	1	1 rad.s <sup>-2</sup>
amortissement ponctuel	kg.s <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	5.710 10 <sup>-3</sup> lbf.s.in <sup>-1</sup>
amortissement volumique	kg.m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-9</sup>	93.572 lbf.s.in <sup>-4</sup>
angle	rad	1	1	1	1	1	1 rad
coefficient de dilatation	m.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	1	1	1	1	1	1.8 in.in <sup>-1</sup> .°F <sup>-1</sup>
contrainte	Pa	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	1.450 10 <sup>-4</sup> psi
énergie	J	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10	8.850 lbf.in
épaisseur	m	1	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	39.370 in
force	N	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	0.2248 lbf
fréquence	Hz	1	1	1	1	1	1 Hz
inertie	m <sup>4</sup>	1	1	10 <sup>12</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>8</sup>	2.4025 10 <sup>6</sup> in <sup>4</sup>
inertie rotatoire	kg.m <sup>2</sup> .rad <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10	
longueur	m	1	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	39.370 in
masse	kg	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	5.710 10 <sup>-3</sup> lbf.s <sup>2</sup> .in <sup>-1</sup>
masse volumique	kg.m <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-9</sup>	93.572 lbf.s <sup>2</sup> .in <sup>-4</sup>
module d'Young	Pa	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	1.450 10 <sup>-4</sup> psi
moment	Nm	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10	8.850 lbf.in
perméabilité	m.s <sup>-1</sup>	1	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	39.370 in. s <sup>-1</sup>
poids volumique	N.m <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-7</sup>	
raideur	N.m <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	
raideur rotatoire	N.m.rad <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10	8.850 lbf.in.rad <sup>-1</sup>
section	m <sup>2</sup>	1	1	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>	1550 in <sup>2</sup>
température	K	1	1	1	1	1	0.5556 °F
temps	s	1	1	1	1	1	1 s
viscosité dynamique	Pl (Pa.s)	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	1.450 10 <sup>-4</sup>
vitesse	m.s <sup>-1</sup>	1	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	39.370 in.s <sup>-1</sup>
vitesse rotatoire	rad.s <sup>-1</sup>	1	1	1	1	1	1 rad.s <sup>-1</sup>
volume	m <sup>3</sup>	1	1	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>6</sup>	61023.98 in <sup>3</sup>

## 2. QUANTITES CARACTERISTIQUES EN MECANIQUE DES STRUCTURES

- La vitesse des ondes de compression est définie par la relation

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

dans laquelle

E module d'Young

$\rho$  masse volumique

L'unité SI est le m.s<sup>-1</sup>

- Le module de cisaillement est défini par la relation

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

dans laquelle

E module d'Young

$\nu$  coefficient de Poisson  $-1 < \nu < 0.5$  ( $\nu = 0.5$  incompressible)

L'unité SI est le Pa

- La vitesse des ondes de cisaillement est définie par la relation

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

dans laquelle

G module de cisaillement

$\rho$  masse volumique

L'unité SI est le m.s<sup>-1</sup>

- Les coefficients de Lamé sont définis par les relations

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} = G$$

dans lesquelles

E module d'Young L'unité SI est le Pa

G module de cisaillement L'unité SI est le Pa

$\nu$  coefficient de Poisson  $-1 < \nu < 0.5$  ( $\nu = 0.5$  incompressible)

L'unité SI est le Pa

- Et inversement

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$



- Le module de compressibilité est défini par la relation

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \lambda + \frac{2}{3}\mu$$

dans laquelle

E	module d'Young	L'unité SI est le Pa
K	module de compressibilité	L'unité SI est le Pa
$\nu$	coefficient de Poisson	$-1 < \nu < 0.5$ ( $\nu = 0.5$ incompressible)
L'unité SI est le Pa		

- Le coefficient de dilatation est défini par

$$\alpha_L = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}$$

dans laquelle

$\Delta T$	variation de température	L'unité SI est le K
$\Delta l$	variation de <b>longueur</b>	L'unité SI est le m
$l_0$	<b>longueur</b> initiale	L'unité SI est le m

L'unité SI est le  $K^{-1}$

C'est donc le coefficient de dilatation **linéaire**. Le coefficient de dilatation volumique, défini par  $\alpha_v = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T}$  est le triple du coefficient de dilatation linéaire dans le cas où le matériau serait isotrope.

### 3. QUELQUES VALEURS CARACTERISTIQUES EN MECANIQUE DES STRUCTURES

On trouvera ici quelques ordres de grandeur (à 293 K) que l'utilisateur devra vérifier avant toute utilisation. On appelle

- $\rho$  masse volumique
- $E$  module d'Young
- $\nu$  coefficient de Poisson  $-1 < \nu < 0.5$  ( $\nu = 0.5$  incompressible)
- $\alpha$  coefficient de dilatation linéaire
- $\sigma_y$  limite d'élasticité mesurée en général à 0.2 % de déformation

	$\rho$ kg.m <sup>-3</sup>	$E$ 10 <sup>10</sup> Pa	$\nu$	$\alpha$ 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	$\sigma_y$ 10 <sup>6</sup> Pa
<b>Acier</b>	7 850	21	0.3	12	200 à 1 500
<b>Aluminium</b>	2 700	6 à 8	0.33	25	50 à 200
<b>Béton</b>	2 300	2.5 à 4	0.18	12	
<b>Bois //</b>	500 à 1 000	1.1	0.45	4	
<b>Caoutchouc</b>	1 200	5 10 <sup>-4</sup>	0.5	80	4
<b>Cuivre</b>	9 000	12	0.35	17	
<b>Fonte</b>	7 200	1	0.25	10	
<b>Plexiglas</b>	1 200	0.3	0.3	90	
<b>Plomb</b>	11 500	1.7	0.45	30	10
<b>Résine époxy</b>	1 200	0.3	0.4	50	
<b>Roche</b>	2 500	5	0.2	8	
<b>Titane</b>	4 500	11	0.25	8	400 à 800
<b>Verre</b>	2 500	7	0.22	8	
<b>Zinc</b>	7 100	8.5	0.25	26	60

## 4. CALCULS STATIQUES NON LINEAIRES MECANIQUES

*lire d'abord le chapitre CALCULS MECANIQUES LINEAIRES (Voir le Tome 1)*

### 4.1 MODELE EN MECANIQUE NON LINEAIRE

#### MODEle

Quelques modèles pour le non linéaire (pour une information complète faire **INFO**

#### MODE ;)

MECANIQUE ELASTIQUE (sous-entendu ISOTROPE) - Tome 1

MECANIQUE ELASTIQUE ORTHOTROPE - Tome 1

MECANIQUE ELASTIQUE ANISOTROPE - Tome 1

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE (sous-entendu ISOTROPE)

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE PARFAIT

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CINEMATIQUE

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE DRUCKER\_PARFAIT

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE DRUCKER\_PRAGER

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CHABOCHE1

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CHABOCHE2

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE ENDOMMAGEABLE

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE BETON

FROTTEMENT COULOMB

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE RCCMR\_304

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE NORTON

MECANIQUE ELASTIQUE VISCOPLASTIQUE PARFAIT

MECANIQUE ELASTIQUE VISCOPLASTIQUE DDI

MECANIQUE ELASTIQUE VISCOPLASTIQUE GUIONNET

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE COULOMB

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE JOINT\_DILATANT

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE AMADEI

MECANIQUE ELASTIQUE ENDOMMAGEMENT UNILATERAL

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE BETON\_UNI

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE OTTOSEN

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE BETON\_INSA

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE BETOCYCL

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE UBIQUITOUS

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE CAM\_CLAY

*(ne marche pas en contraintes planes)*

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE BLACKBURN

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE BLACKBURN\_2

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE LEMAITRE

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE RCCMR\_316

MECANIQUE ELASTIQUE CERAMIQUE

MECANIQUE ELASTIQUE POLYNOMIAL

LIQUIDE - Tome 1

LIQUIDE MECANIQUE (interface fluide-solide) - Tome 1

POREUX (sous entendu ELASTIQUE) - Tome 1  
POREUX ELASTIQUE PLASTIQUE CINEMATIQUE  
POREUX ELASTIQUE PLASTIQUE DRUCKER\_PARFAIT  
POREUX ELASTIQUE PLASTIQUE DRUCKER\_PRAGER  
POREUX ELASTIQUE PLASTIQUE ISOTROPE  
POREUX ELASTIQUE PLASTIQUE PARFAIT

Les éléments de type « coques » (COQ3, COQ4, DKT, DST ...), en plasticité, peuvent avoir soit un comportement global, gouverné par la composante ALFA du matériau (voir l'opérateur MATERiau dans le tome 1), soit un comportement « intégré » dans l'épaisseur si l'on met dans MODE la composante INTEGRE suivie du nombre (impair compris entre 1 et 19) de points d'intégration dans l'épaisseur.

*Le comportement élastique est isotrope dans tous les cas du matériau plastique. La plasticité « isotrope » fait référence au type d'écrouissage (homothétie de la surface de charge, modèle de Prandtl-Reuss); la plasticité « cinématique » (modèle de Prager) est une translation de la surface de charge.*

*(voir MATERiau ci dessous)*

## 4.2 CONDITIONS AUX LIMITES

Pour les conditions aux limites élémentaires, on se reportera au Tome 1.

### **IMPFrottement**

Permet de créer un maillage d'élément de frottement pour remplir l'indice FROTTEMENT dans **PASAPAS**. Il ne fonctionne qu'après **IMPOser**. Le modèle associé doit être **FROTTEMENT COULOMB**.

MF = **IMPF** MC ;

MC    MAILLAGE (créé par **IMPOser**)

MF    MAILLAGE

(voir *IMPOser*, *MODEle*, *PASAPAS* ci-dessous)

### **IMPOser**

Permet de créer un maillage d'élément de contact pour remplir l'indice CONTACT dans **PASAPAS**. Il ne fonctionne qu'avec des éléments SEG2. Les lignes ne doivent pas se regarder au sens des normales. Pour le vérifier, on peut utiliser la procédure PATIN décrite dans le volume DESCRIPTION du LANGAGE ou l'opérateur VSURface décrit dans le volume VERIFICATION des DONNEES.

MC = **IMPO MAIL** L1 L2 ;

L1    MAILLAGE (ligne)

L2    MAILLAGE (ligne)

MC    MAILLAGE

(voir *IMPFrottement*, *PASAPAS* ci-dessous)

### 4.3 MATERIAU EN MECANIQUE NON LINEAIRE

#### MATERIAU

Données nécessaires pour quelques matériaux pour le non linéaire donnés dans l'ordre des modèles. (pour une information complète faire **INFO MATE** ;). Pour les caractéristiques géométriques (épaisseur, section, inertie, excentrement ..), on se reportera au Tome 1.

Le nom des variables internes peut être obtenu par

```
LVA = EXTR mo VARI ;  
      mo MMODEL  
LVA LISTMOTS
```

Le nom des composantes peut être obtenu par

```
LVA = EXTR mo MATE  
      mo MMODEL  
LVA LISTMOTS
```

Toutes les courbes de traction sont fournies en déformation totale  $\epsilon_t$  (il faut ajouter le rapport limite élastique/module d'Young à la déformation plastique)

p11) Modèle élasto-PLASTIQUE à écrouissage isotrope (Von Mises)

```
YOUN, NU, (ALPH), (RHO), TRAC  
      TRAC      EVOLUTIO (courbe de traction  $\sigma=f(\epsilon_t)$ )
```

Il y a une variable interne EPSE.

*Attention:*

*Le premier point doit être  $\epsilon_0 = 0$ ,  $\sigma_0 = 0$ .*

*Le rapport  $\sigma_1 / \epsilon_1$  doit être égal au module d'Young. La pente initiale doit être la plus forte.*

*Les courbes de traction sont le plus souvent fournies pour des petits déplacements. Dans le cas contraire, il faut modifier les valeurs avec les formules suivantes où l'indice 0 représente la valeur en petites perturbations:*

$$\epsilon = \text{Log}(1 + \epsilon_0)$$

*pour les poutres*

$$\sigma = \sigma_0(1 + \epsilon_0)^v$$

*pour les coques*

$$\sigma = \sigma_0(1 + \epsilon_0)^v$$

*pour les massifs*

$$\sigma = \sigma_0(1 + \epsilon_0)^{2v}$$

*Sachant que la déformation plastique se fait en général à volume constant ( $v=0.5$ )*

p12) Modèle élasto-PLASTIQUE PARFAIT (Von Mises)

```
YOUN, NU, (ALPH), (RHO), SIGY  
      SIGY      FLOTTANT (limite élastique)
```

Il y a une variable interne EPSE.

pl3) Modèle élasto-PLASTIQUE à écrouissage CINEMATIQUE (Von Mises)

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), SIGY, H

SIGY FLOTTANT (limite élastique)

H FLOTTANT (module d'écrouissage)

Les variables internes sont EPSE et les composantes du tenseur contrainte.

pl4) Modèle élasto-PLASTIQUE DRUCKER PARFAIT

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), LTR, LCS

LTR FLOTTANT (limite en traction simple)

LCS FLOTTANT (limite en compression simple)

Il y a une variable interne EPSE.

pl5) Modèle élasto-PLASTIQUE DRUCKER PRAGER

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), ALFA, BETA, K, ETA, MU, KL, H, GAMM,  
DELT

ALFA FLOTTANT

BETA FLOTTANT

K FLOTTANT

ETA FLOTTANT

MU FLOTTANT

KL FLOTTANT

H FLOTTANT

GAMM FLOTTANT

DELT FLOTTANT

Il y a une variable interne EPSE.

pl6) Modèle élasto-PLASTIQUE CHABOCHE1 (Chaboche à un centre et écrouissage isotrope)

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), A, C, PSI, OMEG, R0, (RM), (B)

A FLOTTANT (évolution du centre)

C FLOTTANT (évolution du centre)

PSI FLOTTANT (terme de rappel)

OMEG FLOTTANT (terme de rappel)

R0 FLOTTANT (limite élastique)

RM FLOTTANT (limite élastique finale)

B FLOTTANT (évolution de la limite élastique)

Les variables internes sont EPSE et les composantes du tenseur contrainte.

pl7) Modèle élasto-PLASTIQUE CHABOCHE2 (Chaboche à deux centres et écrouissage isotrope)

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), A1, C1, A2, C2, PSI, OMEG, R0, (RM), (B)

A1 FLOTTANT (évolution du premier centre)

C1 FLOTTANT (évolution du premier centre)

A2 FLOTTANT (évolution du deuxième centre)

C2 FLOTTANT (évolution du deuxième centre)

PSI	FLOTTANT (terme de rappel)
OMEG	FLOTTANT (terme de rappel)
R0	FLOTTANT (limite élastique)
RM	FLOTTANT (limite élastique finale)
B	FLOTTANT (évolution de la limite élastique)

Les variables internes sont EPSE, les composantes du tenseur contrainte et du tenseur XM.

pl8) Modèle élasto-PLASTIQUE ENDOMMAGEABLE (Lemaitre-Chaboche)

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), TRAC, EPSD, DC, EPSR	
TRAC	EVOLUTIO (courbe de traction)
EPSD	FLOTTANT (seuil d'endommagement)
DC	FLOTTANT (valeur critique caractérisant la rupture)
EPSR	FLOTTANT (déformation plastique à la rupture)

Les variables internes sont EPSE, VIR, D et les composantes du tenseur déformation.

pl9) Modèle PLASTIQUE de COULOMB

KS, KN, (ALPN), (RHO), EF, ECN, COHE, FRIC, (FTRC)	
KS	FLOTTANT
KN	FLOTTANT
EF	FLOTTANT (seconde raideur normale)
ECN	FLOTTANT (seuil de déformation)
COHE	FLOTTANT (cohésion)
FRIC	FLOTTANT (angle de frottement)
FTRC	FLOTTANT (résistance à la traction) 0. par défaut

Les variables internes sont EPSE, EPOU, STAT, LAM1

pl10) Modèle PLASTIQUE de JOINT\_DILATANT

KS, KN, (ALPN), (RHO), PHI, MU, FTRC	
KS	FLOTTANT
KN	FLOTTANT
PHI	FLOTTANT (angle de frottement)
MU	FLOTTANT (angle de dilatance)
FTRC	FLOTTANT (résistance maximale à la traction)

Les variables internes DS0, DN0, DRSN, DRN, DPSN, DPN, HC11, HC12, HC21, HC22.

*Ce modèle ne fonctionne qu'en bidimensionnel plan.*

pl11) Modèle PLASTIQUE de AMADEI

KS, KN, (ALPN), (RHO), FIMU, SGMT, IO, S0, B0, UP, UR, KNI, FI0, VM	
KS	FLOTTANT
KN	FLOTTANT
FIMU	FLOTTANT (seconde raideur normale)
SGMT	FLOTTANT (seuil de déformation)
IO	FLOTTANT (cohésion)
S0	FLOTTANT (angle de frottement)
B0	FLOTTANT (résistance à la traction) 0. par défaut
UP	



UR  
KNI  
FIO  
VM

Les variables internes sont EPSE, EPOU, STAT, UEQU, EPS1, EPS2, EPS3  
*Ce modèle ne fonctionne pas en contraintes planes.*

pl12) Modèle PLASTIQUE UBIQUITOUS

YOUN, NU, (RHO), NCRI, ANG1, TRA1, PHI1, PSI1, ANG2, TRA2, PHI2, PSI2

NCRI	ENTIER -
ANG1	FLOTTANT - angle (en degrés) de la 1 <sup>ère</sup> direction avec l'axe X (ou R)
TRA1	FLOTTANT - limite en traction dans la 1 <sup>ère</sup> direction
PHI1	FLOTTANT - angle (en degrés) de frottement dans la 1 <sup>ère</sup> direction
PSI1	FLOTTANT - angle (en degrés) de dilatance dans la 1 <sup>ère</sup> direction
ANG2	FLOTTANT - angle (en degrés) de la 2 <sup>e</sup> direction avec l'axe X (ou R)
TRA2	FLOTTANT - limite en traction dans la 2 <sup>e</sup> direction
PHI2	FLOTTANT - angle (en degrés) de frottement dans la 2 <sup>e</sup> direction
PSI2	FLOTTANT - angle (en degrés) de dilatance dans la 2 <sup>e</sup> direction

Les variables internes sont EPSE, EPN1, GAP1, LAM1.  
*Ce modèle ne fonctionne qu'avec OPTIon DIMension 2.*

pl13) Modèle PLASTIQUE CAM\_CLAY

YOUN, NU, (RHO), E0, M, COHE, P0, KAPA, LAMD, G1

E0	FLOTTANT - indice des vides initial
M	FLOTTANT - coefficient de frottement
COHE	FLOTTANT - cohésion
P0	FLOTTANT - pression de préconsolidation
KAPA	FLOTTANT - pente élastique
LAMD	FLOTTANT - pente plastique
G1	FLOTTANT

Les variables internes sont EPSE, TRAP.

en1) Modèle ENDOMMAGEMENT UNILATERAL

YOUN, NU, (RHO), (ALPH), YS1, YS2, A1, B1, A2, B2, BET1, BET2, SIGF

YS1	FLOTTANT
YS2	FLOTTANT
A1	FLOTTANT
B1	FLOTTANT
A2	FLOTTANT
B2	FLOTTANT
BET1	FLOTTANT
BET2	FLOTTANT

SIGF FLOTTANT

Il y a quatre variables internes YLI1, YLI2, DOM1, DOM2.

fr1) Modèle FROTTEMENT COULOMB

MU, (COHE), (ADHE)

MU FLOTTANT (coefficient de frottement)

COHE FLOTTANT (coefficient de cohésion)

ADHE FLOTTANT (coefficient d'adhérence)

Les variables internes sont

be1) Modèle élasto-PLASTIQUE BETON (en contraintes planes)

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), LTR1, ETR1, LTR2, ETR2, BETR, VF1X,  
VF1Y, LCS, ECS, LBIC

LTR1 FLOTTANT ( $YOUN * 1.2 * 10^{-4}$ )

ETR1 FLOTTANT ( $3 * LTR1 / YOUNG$ )

LTR2 FLOTTANT (LTR1)

ETR2 FLOTTANT ( $3 * LTR2 / YOUNG$ )

BETR FLOTTANT (0.1)

VF1X FLOTTANT (1.)

VF1Y FLOTTANT (0.)

LCS FLOTTANT ( $YOUN * 1.2 * 10^{-3}$ ) doit être supérieur aux  
limites en traction.

ECS FLOTTANT ( $10 * LCS / YOUNG$ )

LBIC FLOTTANT

On doit avoir  $LBIC > LCS > LTRi$

Les variables internes sont EPSE, DAM1, DAM2, DAM3, OUV1, OUV2,  
OUV3, LAMD, VF1X, VF1Y, VF1Z, VF2X, VF2Y, VF2Z, VF3X, VF3Y, VF3Z.

be2) Modèle élasto-PLASTIQUE BETON (en axisymétrie et tridimensionnel)

Ce modèle est non-linéaire en traction seulement.

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), LTR1, ETR1, LTT1, ETT1, ERS1, LTR2,  
ETR2, LTT2, ETT2, ERS2, LTR3, ETR3, LTT3, ETT3, ERS3, BETR, VF1X,  
VF1Y, VF1Z, VF2X, VF2Y, VF2Z, VF3X, VF3Y, VF3Z

LTR1 FLOTTANT ( $YOUN * 1.2 * 10^{-4}$ )

ETR1 FLOTTANT ( $3 * LTR1 / YOUNG$ )

LTR2 FLOTTANT (LTR1)

ETR2 FLOTTANT ( $3 * LTR2 / YOUNG$ )

BETR FLOTTANT (0.1)

VF1X FLOTTANT (1.)

VF1Y FLOTTANT (0.)

Les variables internes sont EPSE, DAM1, DAM2, DAM3, OUV1, OUV2,  
OUV3, LAMD, VF1X, VF1Y, VF1Z, VF2X, VF2Y, VF2Z, VF3X, VF3Y, VF3Z.

be3) Modèle BETON\_UNI

YOUN, NU, (RHO), (ALPH), STFC, EZER, STFT, ALF1, OME1, ZETA,  
ST85, TRAF

STFC FLOTTANT

EZER FLOTTANT

STFT FLOTTANT

ALF1	FLOTTANT
OME1	FLOTTANT
ZETA	FLOTTANT
ST85	FLOTTANT
TRAF	FLOTTANT

Il y a six variables internes FLAG, EPSO, EMAX, EPLA, SLOP, TANG.

#### be4) Modèle OTTOSEN

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), LXX, LYY, LXY, LZZ, PXX, PYY, PXY, LTR, GFTR, GS, BTR, GFCS, LCS, BCS, WRUP, BILI, EPSR, GFT1, GFT2, GFT3, GS1, GS2, GS3, LTR1, LTR2, LTR3, GFC1, GFC2, GFC3, LCS1, LCS2, LCS3, WRU1, WRU2, BIL1, BIL2

LTR	FLOTTANT ( $YOUN * 1.2 * 10^{-4}$ ) limite en traction
GFTR	FLOTTANT ( $LTR * 3.9 * 10^{-5}$ ) taux de restitution de l'énergie
GS	FLOTTANT ( $YOUN * 1.8 * 10^{-4}$ ) résistance au cisaillement
BTR	FLOTTANT (0.2)
EPSR	FLOTTANT ( $3 * LTR / YOUN$ ) déformation à la rupture dans la direction transverse en axisymétrique ou déformation plane.

Tous les autres paramètres sont fournis par l'opérateur TAILle.

ca = **TAIL DIRE** mo ; l'objet ca doit être concaténé avec le matériau dans l'indice CARACTERISTIQUES de la table pour PASAPAS.

Les variables internes sont (en contraintes planes) EPSE, W1MA, W2MA, W1, W2, VF1X, VF1Y, VF2X, VF2Y, IVL1, IVL2.

Les variables internes sont (en déformations planes ou en axisymétrique) EPSE, W1MA, W2MA, EPSM, W1, W2, EPS, VF1X, VF1Y, VF2X, VF2Y, IVL1, IVL2, IVL3.

Les variables internes sont (en tridimensionnel) EPSE, W1MA, W2MA, W3MA, W1, W2, W3, VF1X, VF1Y, VF1Z, VF2X, VF2Y, VF2Z, VF3X, VF3Y, VF3Z, IVL1, IVL2, IVL3.

*On trouvera des compléments dans*

*Modèle Ottosen de comportement du béton en fissuration - rapport DMT/94-697 - De Mersseman, Millard*

*Introduction du modèle Ottosen dans CASTEM2000®. Formulation, Implantation - rapport DMT/94-705 - De Mersseman, Millard*

*Smearred crack analysis using generalized fictitious crack model - Journal of Engineering Mechanics Vol 16 n°1 jan 1990 - Dahlblom, Ottosen*

#### be5) Modèle BETON\_INSA

YOUN, NU, (RHO), ALFA, LCS, EMAX, EPUT, ICOM, FTC, LFTR	
ALFA	FLOTTANT (0.1)
LCS	FLOTTANT ( $YOUN * 10^{-3}$ )
EMAX	FLOTTANT ( $10 * LCS / YOUN$ )
EPUT	FLOTTANT ( $3 * ALFA * LCS / YOUN$ )
ICOM	ENTIER (0)
FTC	FLOTTANT (0.1)
LFTR	FLOTTANT (0.15 - si EPUT n'est pas fourni)

Les variables internes sont EPSE, TAN1, TAN2, IPL1, IFI2, RTM1, RTM2, IFI1, JFI1, ANGL, JFI2, EQC1, EPE1, EPT1, EPT2, EQC2, EPE2, EPC1, EPC2, IPL2, OUV1, EDC1, EDC2, ETS1, ETS2, EDT1, EDT2, OUV2, DFR1, DFR2, IPAS, TEMP, EP01, EP02, EP03, (EP04), (EP05), (EP06). Les variables entre parenthèses apparaissent en tridimensionnel.

be6) Modèle BETOCYCL

YOUN, NU, (RHO), HHH1, FTPE, FCPE, FTGR, FCGR, WORD, TREV, COEV, LCAT, LCAC, EPSO

HHH1	FLOTTANT
FTPE	FLOTTANT
FCPE	FLOTTANT
FTGR	FLOTTANT
FCGR	FLOTTANT
WORD	FLOTTANT
TREV	FLOTTANT
COEV	FLOTTANT
LCAT	FLOTTANT
LCAC	FLOTTANT
EPSO	FLOTTANT

Les variables internes sont SIH1, SIH2, EPS1, EPS2, CPHI, SPHI, CON1, CON2, CON3, CON4, CAS1, CAS2, LAM1, LAM2.

f11) Modèle FLUAGE RCCMR\_304

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), SMAX, BF1, BF2, BF3, RF1, RF2, RF3, AF1, SF1, AF2, AF3, SF2

SMAX	FLOTTANT
BF1	FLOTTANT
BF2	FLOTTANT
BF3	FLOTTANT
RF1	FLOTTANT
RF2	FLOTTANT
RF3	FLOTTANT
AF1	FLOTTANT
SF1	FLOTTANT
AF2	FLOTTANT
AF3	FLOTTANT
SF2	FLOTTANT

La loi est de la forme

$$\varepsilon_F = A1 * (1 - e^{-Rt}) + A2 * (1 - e^{-St}) + Bt$$

avec

$$B = BF1 * \left( \sinh \frac{BF2 \cdot \sigma}{BF3} \right)^{BF3}$$

$$R = RF1 * \left( \sinh \frac{RF2 \cdot \sigma}{RF3} \right)^{RF3}$$

$$A1 = AF1 * \frac{B}{R}$$

$$S = R * \frac{SF1}{RF1}$$

$$A2 = AF2 + AF3 \cdot \sigma \quad \text{si } \sigma > SF2$$

$$A2 = 0 \quad \text{si } \sigma < SF2$$

Les variables internes sont EPCE, EPSH, LL, EPSE et PRR, PZZ, PTT, PRZ, NRR, NZZ, NTT, NRZ, ECRR, ECZZ, ECTT, ECRZ en axisymétrique.

PXX, PYY, PZZ, PXY, NXX, NYY, NZZ, NXY, ECXX, ECYY, ECZZ, ECXY en plan.

PXX, PYY, PZZ, PXY, PYZ, PXZ, NXX, NYY, NZZ, NXY, NYZ, NXZ, ECXX, ECYY, ECZZ, ECXY, ECYZ, ECXZ en massif tridimensionnel.

PMSS, PMTT, PMNN, PMST, PMSN, PMTN, NMSS, NMTT, NMNN, NMST, NMSN, NMTN en coques épaisses.

#### f12) Modèle FLUAGE NORTON (strain hardening ou écrouissage par la déformation)

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), AF1, AF2, AF3, SMAX

AF1 FLOTTANT

AF2 FLOTTANT

AF3 FLOTTANT

SMAX FLOTTANT

La loi est de la forme

$$\varepsilon_F = AF1 * \sigma^{AF2} * t^{AF3}$$

Les variables internes sont EPCE, EPSH, LL, EPSE et PRR, PZZ, PTT, PRZ, NRR, NZZ, NTT, NRZ en axisymétrique.

PXX, PYY, PZZ, PXY, NXX, NYY, NZZ, NXY en plan.

PXX, PYY, PZZ, PXY, PYZ, PXZ, NXX, NYY, NZZ, NXY, NYZ, NXZ en massif tridimensionnel.

PMSS, PMTT, PMNN, PMST, PMSN, PMTN, NMSS, NMTT, NMNN, NMST, NMSN, NMTN en coques épaisses.

#### f13) Modèle FLUAGE BLACKBURN

YOUN, NU, (RHO), AF1, AF2, AF3, AF4, RF1, RF2, RF3, RF4, BF1, BF2, BF3, BF4, BF5, SMAX

AF1 FLOTTANT

AF2 FLOTTANT

AF3 FLOTTANT

AF4 FLOTTANT

BF1 FLOTTANT

BF2 FLOTTANT

BF3 FLOTTANT

BF4 FLOTTANT

BF5	FLOTTANT
RF1	FLOTTANT
RF2	FLOTTANT
RF3	FLOTTANT
RF4	FLOTTANT
SMAX	FLOTTANT - contrainte de référence (par défaut YOUN/1000)

La loi est de la forme

$$\varepsilon_F = A * (1 - e^{-Rt}) + Bt$$

$$A = AF1 * e^{-AF2.\sigma} + AF3 * \sigma^{AF4}$$

avec  $B = BF1 * (\sinh BF2.\sigma)^{BF3} + BF4 * e^{-BF5.\sigma}$

$$R = RF1 * e^{-RF2.\sigma} + RF3 * \sigma^{RF4}$$

Les variables internes sont

#### fl4) Modèle FLUAGE BLACKBURN\_2

YOUN, NU, (RHO), AF1, AF2, AF3, AF4, RF1, RF2, RF3, RF4, BF1, BF2, BF3, BF4, BF5, SMAX

AF1	FLOTTANT
AF2	FLOTTANT
AF3	FLOTTANT
AF4	FLOTTANT
BF1	FLOTTANT
BF2	FLOTTANT
BF3	FLOTTANT
BF4	FLOTTANT
BF5	FLOTTANT
RF1	FLOTTANT
RF2	FLOTTANT
RF3	FLOTTANT
RF4	FLOTTANT
SMAX	FLOTTANT - contrainte de référence (par défaut YOUN/1000)

La loi est de la forme

$$\varepsilon_F = A * (1 - e^{-Rt}) + Bt$$

$$A = AF1 * e^{-AF2.\sigma} + AF3 * \sigma^{AF4}$$

avec  $B = BF1 * (\sinh BF2.\sigma)^{BF3} + BF4 * \sigma^{BF5}$

$$R = RF1 * e^{-RF2.\sigma} + RF3 * \sigma^{RF4}$$

Les variables internes sont

#### fl5) Modèle FLUAGE RCCMR\_316

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), AF1, AF2, AF3, BF1, BF2, TF1, TF2, SMAX

AF1	FLOTTANT
AF2	FLOTTANT
AF3	FLOTTANT
BF1	FLOTTANT
BF2	FLOTTANT

TF1	FLOTTANT
TF2	FLOTTANT
SMAX	FLOTTANT - contrainte de référence (par défaut YOUN/1000)

La loi est de la forme

$$\varepsilon_F = AF1 * \sigma^{AF2} * t^{AF3} \quad \text{si } t < TF \quad \text{Norton}$$

$$\varepsilon_F = BF1 * \sigma^{BF2} \quad \text{si } t > TF$$

avec  $TF = TF1 * \sigma^{TF2}$

Les variables internes sont EPCE, EPSH, LL, EPSE et PRR, PZZ, PTT, PRZ, NRR, NZZ, NTT, NRZ, ECRR, ECZZ, ECTT, ECRZ en axisymétrique.  
PXX, PYY, PZZ, PXY, NXX, NYY, NZZ, NXY, ECXX, ECYY, ECZZ, ECXY en plan.  
PXX, PYY, PZZ, PXY, PYZ, PXZ, NXX, NYY, NZZ, NXY, NYZ, NXZ, ECXX, ECYY, ECZZ, ECXY, ECYZ, ECXZ en massif tridimensionnel.  
PMSS, PMTT, PMNN, PMST, PMSN, PMTN, NMSS, NMTT, NMNN, NMST, NMSN, NMTN en coques épaisses.

#### fl6) Modèle FLUAGE LEMAITRE

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), AF1, AF2, AF3, AF4, KXF, KYF, SMAX

AF1	FLOTTANT
AF2	FLOTTANT
AF3	FLOTTANT
AF4	FLOTTANT
KXF	FLOTTANT
KYF	FLOTTANT
SMAX	FLOTTANT - contrainte de référence (par défaut YOUN/1000)

La loi est de la forme

$$\varepsilon_F = AF1 * (X^{AF2} + Y)$$

avec  $\frac{dX}{dt} = \left( \frac{\sigma}{KXF} \right)^{\frac{AF3}{AF2}} * AF4^{\frac{1}{AF2}}$

$$\frac{dY}{dt} = \left( \frac{\sigma}{KYF} \right)^{AF3} * AF4$$

Les variables internes sont

#### fl7) Modèle FLUAGE CERAMIQUE

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), AF1, AF2, AF3, TTRA, ENDG, SMAX

AF1	FLOTTANT
AF2	FLOTTANT
AF3	FLOTTANT
TTRA	FLOTTANT - température de transition
ENDG	FLOTTANT
SMAX	FLOTTANT - contrainte de référence (par défaut YOUN/1000)

La loi au dessus de la température de transition, est de la forme (Norton)

$$\varepsilon_F = AF1 * \sigma^{AF2} * t^{AF3}$$

Au dessous de la température de transition le matériau se comporte selon le modèle OTTOSEN (voir page 19).

Les variables internes sont

fl8) Modèle FLUAGE POLYNOMIAL

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), AF1, AF2, AF3, TTRA, ENDG, SMAX

AF0	FLOTTANT
AF1	FLOTTANT
AF2	FLOTTANT
AF3	FLOTTANT
AF4	FLOTTANT
AF5	FLOTTANT
AF6	FLOTTANT
SMAX	FLOTTANT - contrainte de référence (par défaut YOUN/1000)

La loi est de la forme

$$\varepsilon_F = AF0 + AF1 * \sigma^{AF2} + AF3 * \sigma^{AF4} + AF5 * \sigma^{AF6}$$

Les variables internes sont

vp1) Modèle VISCOPLASTIQUE PARFAIT

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), SIGY, K, N

SIGY	FLOTTANT
K	FLOTTANT
N	FLOTTANT

La loi est de la forme

$$\frac{d\varepsilon_{VP}}{dt} = \left( \frac{\sigma - \sigma_Y}{K} \right)^N$$

La variable interne est EPSE

(voir *MODEle* ci dessus)

vp2) Modèle VISCOPLASTIQUE DDI

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), SIGY, K, N

vp3) Modèle VISCOPLASTIQUE GUIONNET

YOUN, NU, (ALPH), (RHO), SIGY, K, N



## 4.4 CHARGEMENT EN MECANIQUE NON LINEAIRE

Voir le Tome 1 pour la description des chargements élémentaires.

### CHARGement

Crée un objet de type CHARGEME selon deux possibilités :

CH1 = **CHAR** mot FT EV;

mot MOT de valeur **CONT, DIMP, MECA** ou **PSUI** ou **T**

FT CHPOINT de forces (voir le Tome 1). Dans le cas PSUI, il ne doit avoir qu'une composante, dans le cas CONT, c'est un MCHAML de type CONTRAIN

EV EVOLUTIO

CH1 = **CHAR** mot ttab ftab;

mot MOT de valeur **CONT, DIMP, MECA** ou **PSUI** ou **T**

ttab TABL de FLOTTANT indiquée par des ENTIER de 0 à n. On doit avoir ttab . 0 = 0. ;

ftab TABL de CHPOINT (ou de MCHAML dans le cas CONT) indiquée par les mêmes ENTIER de 0 à n et contenant les chargements aux instants figurant dans ttab.

(voir *BSIGma*, *CNEquivalent*, *DEPImposé*, *EVOLution* ci dessous, *FORCe*, *MOMEnt*, *PRESsion* dans le Tome 1)

### EVOLution

Permet de définir une variation

EV = **EVOL MANU** nomabs lista nomord listo ;

(voir *CHARGement* ci-dessus)

## 4.5 RESOLUTION EN MECANIQUE NON LINEAIRE

### DIMENSION

Permet d'obtenir la dimension d'une TABLE ou d'un LISTREEL. Utile pour post-traiter les calculs issus de PASAPAS.

NN = **DIME** TAB1.**TEMPS** ;  
TAB1.**TEMPS** TABLE contenant les temps conservés par PASAPAS

(voir le volume *POST-TRAITEMENT*)

### INDEX

Crée une TABLE qui contient les indices d'une TABLE

TIND = **INDE** TAB1 ;  
TAB1 TABLE  
TIND TABLE

(voir *TABLE* dans le chapitre langage)

### PASAPAS

Procédure de calculs non linéaires

**PASAPAS** TAB1 ;

TAB1 TABLE contenant les données et les résultats. Elle doit être déclarée comme telle avant utilisation

TAB1 = **TABL** ;

De même que (éventuellement)

TAB1.**CONSTRAINTES** = **TABL** ;

TAB1.**DEPLACEMENTS** = **TABL** ;

Données (les indices suivants sont à renseigner avant l'utilisation de

PASAPAS)

TAB1.**BLOCAGES\_MECANIKES**

RIGIDITE

TAB1.**CARACTERISTIQUES**

MCHAML

TAB1.**CHARGEMENT**

CHARGEME

TAB1.**CONSTRAINTES . 0**

MCHAML. Les forces équivalentes sont calculées sauf si elles existent dans CHAR CONT.

TAB1.**CONTACT**

MAILLAGE

TAB1.**DEPLACEMENTS . 0**

CHPOINT

TAB1.**FROTTEMENT**

MAILLAGE

TAB1.**GRANDS\_DEPLACEMENTS**

**VRAI**

(**FAUX**) par défaut

TAB1.**GRANDES\_DEFORMATIONS**

**VRAI**

(**FAUX**) par défaut

TAB1.**GRANDES\_ROTATIONS**

**VRAI**

(**FAUX**) par défaut

TAB1.**MODELE**

MMODEL

TAB1.**TEMPS\_CALCULES**

LISTREEL

TAB1.**AUTOMATIQUE**

LOGIQUE

	( <b>FAUX</b> par défaut ou <b>VRAI</b> ). Permet d'adapter le calcul du pas de chargement tel que l'incrément de déformations totales n'excède pas la valeur fournie dans <b>AUTOCRIT</b> . Ne marche pas avec les matériaux dépendants de la température.
TAB1. <b>AUTOCRIT</b>	FLOTTANT (0.005 par défaut)
TAB1. <b>AUTORESU</b>	ENTIER (1 par défaut). Dans le cas de pilotage automatique, indique le pas de sauvegarde
TAB1. <b>FTOL</b>	FLOTTANT
TAB1. <b>TEMPS_SAUVES</b>	LISTREEL

Résultats (les indices suivants sont renseignés par PASAPAS)

TAB1. <b>DEFORMATIONS_INELASTIQUES</b>	TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant la partie non linéaire des déformations. Le nom des composantes dépend du type d'élément fini utilisé (voir le volume Post-Traitement).
TAB1. <b>DEPLACEMENTS</b>	TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT contenant le champ de déplacements. Pour le nom des composantes, voir le chapitre Conditions aux Limites.
TAB1. <b>CONTRAINTES</b>	TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant le champ de contraintes. Pour le nom des composantes, voir le volume Post-Traitement.
TAB1. <b>TEMPS</b>	TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de FLOTTANT
TAB1. <b>REACTIONS</b>	TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de

## TAB1.VARIABLES\_INTERNES

CHPOINT contenant le champ de réaction. Pour le nom des composantes, voir le chapitre Chargement. TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant le champ de variables internes. Le nom des composantes dépend du modèle utilisé (par exemple pour les modèles plastiques de type Von Mises, c'est EPSE -déformation plastique équivalente) (voir page 14).

Même en thermo-mécanique, les contraintes calculées dans PASAPAS sont les contraintes vraies (ie il ne faut pas soustraire les contraintes calculés par THETA), bien entendu si les contraintes sont prises dans la table (avec PECHE par exemple) et non calculées à partir des déplacements. De même dans le cas des contraintes initiales, il ne faut pas les ajouter.

Cas intéressant: le couplage thermique-mécanique en linéaire (voir l'exemple suivant dans le chapitre 5.4 THERMO-ELASTICITE LINEAIRE COUPLEE page 34) et thermique-mécanique en nonlinéaire (chapitre 5.8 THERMO-ELASTO-PLASTICITE COUPLEE page 40)

*(voir TABLE dans le volume LANGAGE)*

## 5. EXEMPLES STATIQUES NON LINEAIRES MECANIQUES

### 5.1 POUR FAIRE UNE REPRISE AVEC PASAPAS

Soit TAB1 la TABLE qui est passée dans **PASAPAS**.

PREMIERE METHODE

Sans sortir de CASTEM2000®

DEUXIEME METHODE

Après sortie de CASTEM2000® où l'on a fait une étape de sauvetage des résultats:

**SAUV** TAB1 ;

On fait donc une reprise:

**REPR** ;

Puis, dans les deux cas, il suffit de choisir l'instant de reprise (par défaut, c'est le dernier sauvé) et d'étendre certaines valeurs de la table .

TAB1 . **REPRISE** = ;

TAB1 . **TEMPS\_CALCULES** = **PROG** tini **PAS** Δt tfin ;

TAB1 . **TEMPS\_SAUVES** = **PROG** tempssauvés ;

Et de relancer

**PASAPAS** TAB1 ;

## 5.2 FROTTEMENT ELASTIQUE EXTERNE

Une (Des) frontière(s) du modèle glisse(nt) sur un (des) corps rigide(s) (non modélisés). La méthode ne permet que **OPTIon DIMENSION 2** ; et des éléments de type SEG2 qui sont COQ2 ou des cotés de TRI3 ou QUA4. Si l'on utilise un maillage de TRI6 ou (et) de QUA8, on peut, *de manière artificielle et en vérifiant attentivement les résultats*, tapisser les lignes de SEG3 avec des SEG2 (soit deux fois plus d'éléments sur la ligne) sans sauter les points « milieux ».

Opérateurs utilisés : **BLOQuer**, **IMP**Frottement, **IMPO**ser, **MATE**riau, **MODE**le, **PASAPAS**.

1<sup>ère</sup> étape

Modélisation de la frontière = création d'un MAILLAGE de SEG2.

2<sup>ème</sup> étape

Modélisation de la frontière du corps rigide = création d'un MAILLAGE distinct sans se préoccuper de la discrétisation (nombre de nœuds éventuellement différent) mais en sens inverse de SEG2

(*donc le maillage de la structure doit être en QUA4 ou en TRI3 avec OPTIon DIMENSION 2*)

*Pas d'ELIM entre les deux MAILLAGEs*

3<sup>ème</sup> étape

**IMPO** entre les deux MAILLAGEs = création d'un MAILLAGE de MULT (à cinq nœuds). Ceci permet de gérer le contact. Les deux lignes doivent se tourner le dos au sens des normales.

MAIL3 = **IMPO MAIL** MAIL1 MAIL2 ;

4<sup>ème</sup> étape

**IMPF** sur le MAILLAGE créé par **IMPO** = création d'un MAILLAGE de MULT (à cinq nœuds). Ceci permet de gérer le frottement.

MAIL4 = **IMPF MAIL** MAIL3 ;

5<sup>ème</sup> étape

**MODE**le sur l'objet créé par **IMPF** = création d'un MMODEL (la seule formulation disponible est **FROTTEMENT COULOMB**)

6<sup>ème</sup> étape

**MATE**riau sur l'objet créé par **MODE**le. Il faut fournir la composante **MU** et éventuellement **COHE**sion et **ADHE**sion.

7<sup>ème</sup> étape

**BLOQ**uer le MAILLAGE de la frontière du corps rigide.

R2 = **BLOQ DEPL** MAIL2 ;

8<sup>ème</sup> étape

Dans la table de **PASAPAS** remplir les indices

**CONTACT** avec le **MAILLAGE** créé par **IMPO** (a)

**FROTTEMENT** avec le **MAILLAGE** créé par **IMPF** (b)

et inclure le

**MMODEL** dans l'indice **MODELE** (c)

**R2** dans l'indice **BLOCAGES\_MECANIKES** (d)

le matériau dans l'indice **CARACTERISTIQUES** (e).

L'indice **GRANDS\_DEPLACEMENTS** est mis à **VRAI** automatiquement

Si l'on ne met pas la 3<sup>ème</sup>, la 4<sup>ème</sup>, la 5<sup>ème</sup>, la 6<sup>ème</sup> et les parties (b, c, e) de la 8<sup>ème</sup> étape, on étudie le contact sans frottement.

9<sup>ème</sup> étape

Lancer **PASAPAS** avec la **TABLE** ainsi construite.

### 5.3 FROTTEMENT ELASTIQUE INTERNE

Des lignes internes glissent les unes sur les autres. La méthode ne permet que **OPTIon DIMension 2** ; et des éléments de type SEG2 qui sont des COQ2 ou des cotés de TRI3 ou QUA4. Si l'on utilise un maillage de TRI6 ou (et) de QUA8, on peut, *de manière artificielle et en vérifiant attentivement les résultats*, tapisser les lignes de SEG3 avec des SEG2 (soit deux fois plus d'éléments sur la ligne) sans sauter les points « milieux ».

Opérateurs utilisés : **BLOQuer**, **IMPfrottement**, **IMPOser**, **MATERiau**, **MODEle**, **PASAPAS**.

#### 1<sup>ère</sup> étape

Modélisation des deux frontières décrites en sens inverse = création d'un MAILLAGE de SEG2.

(*donc le maillage de la structure doit être en QUA4 ou en TRI3 ou en SEG2 avec OPTIon DIMension 2*)

*Pas d'ELIM entre les deux MAILLAGEs*

#### 2<sup>ème</sup> étape

**IMPO** entre les deux MAILLAGEs = création d'un MAILLAGE de MULT (à cinq nœuds). Ceci permet de gérer le contact. Les deux lignes doivent se tourner le dos au sens des normales.

MAIL3 = **IMPO MAIL MAIL1 MAIL2** ;

#### 3<sup>ème</sup> étape

**IMPF** sur le MAILLAGE créé par **IMPO** = création d'un MAILLAGE de MULT (à cinq nœuds). Ceci permet de gérer le frottement.

MAIL4 = **IMPF MAIL3** ;

#### 4<sup>ème</sup> étape

**MODEle** sur l'objet créé par **IMPF** = création d'un MMODEL (la seule formulation disponible est **FROTTEMENT COULOMB**)

#### 5<sup>ème</sup> étape

**MATERiau** sur l'objet créé par **MODEle**. Il faut fournir la composante **MU** et éventuellement **COHESion** et **ADHESion**.

#### 6<sup>ème</sup> étape

**BLOQuer** le MAILLAGE de la frontière du corps rigide.

R2 = **BLOQ DEPL MAIL2** ;

#### 7<sup>ème</sup> étape

Dans la table de **PASAPAS** remplir les indices

**CONTACT** avec le MAILLAGE créé par **IMPO** (a)

**FROTTEMENT** avec le MAILLAGE créé par **IMPF** (b)

et inclure le

MMODEL dans l'indice **MODELE** (c)



R2 dans l'indice **BLOCAGES\_MECANIQUES** (d)  
le matériau dans l'indice **CARACTERISTIQUES** (e).  
L'indice **GRANDS\_DEPLACEMENTS** est mis à **VRAI** automatiquement

Si l'on ne met pas la 3<sup>ème</sup>, la 4<sup>ème</sup>, la 5<sup>ème</sup>, la 6<sup>ème</sup> et les parties (b, c, e) de la 7<sup>ème</sup> étape, on étudie le contact sans frottement.

8<sup>ème</sup> étape

Lancer **PASAPAS** avec la TABLE ainsi construite.

## 5.4 THERMO-ELASTICITE LINEAIRE COUPLEE

On utilise le même maillage pour la thermique et pour la mécanique. Pour plus de détails sur les calculs thermiques voir le volume THERMIQUE DES STRUCTURES. On peut retrouver aussi ce type de problème (en linéaire) dans le Tome 1.

Opérateurs utilisés : *CAPAcité*, *CHARgement*, *ET*, *EVOLution*, *LUMPer*, *MODEle*, *PASAPAS*, *PROGression*.

### 1<sup>ère</sup> étape

Définir le MMODEL thermique

MOTH = **MODE MAIL1 THERMIQUE ISOTROPE** (nomélément) **CONS**

nocot ;

### 2<sup>ème</sup> étape

Définir le MMODEL mécanique

MOME = **MODE MAIL1 MECANIQUE ELASTIQUE** (nomélément)

**CONS** nocom ;

### 3<sup>ème</sup> étape

Définir le MCHAML matériau thermique

MATH = **MATE** MOTH **K** valk 'C' valcp **RHO** valro (cara) ;

### 4<sup>ème</sup> étape

Définir le MCHAML matériau mécanique

MAME = **MATE** MOME **YOUN E NU** v **ALPH**  $\alpha$  (cara) ;

Le calcul mécanique se fera en statique (i.e. on ne tient pas compte des termes d'inertie)

### 5<sup>ème</sup> étape (éventuellement)

Calculer la matrice de capacité diagonalisée

MACAP = **CAPA** MOME MOTH ;

MACAD = **LUMP** MACAP ;

L'objet MACAD sera mis dans l'indice **MASSE\_CONSTANTE** de la TABLE pour **PASAPAS**. Voir le volume THERMIQUE DES STRUCTURES et penser dans ce cas à modifier la procédure TRANSLIN.

### 6<sup>ème</sup> étape

Définir les conditions aux limites thermiques (CLTH)

### 7<sup>ème</sup> étape

Définir les conditions aux limites mécaniques (CLME)

### 8<sup>ème</sup> étape

Définir les chargements thermiques

CHTH = **CHAR** mot FFTH EVTH ;

mot **Q** ou **T** ou **TE**

9<sup>ème</sup> étape (éventuellement)

Définir les chargements mécaniques

CHME = **CHAR MECA** FFME EVME ;

Définir les chargements déplacements imposés

CHME = **CHAR DIMP** FCME ECME ;

10<sup>ème</sup> étape

Remplir les indices de la table pour **PASAPAS** en particulier

<b>BLOCAGES_MECANIQUES</b>	RIGIDITE Assemblage des conditions aux limites mécaniques (CLME)
<b>BLOCAGES_THERMIQUES</b>	RIGIDITE Assemblage des conditions aux limites thermiques (CLTH)
<b>CARACTERISTIQUES</b>	MCHAML Assemblage des MCHAML de matériau (MATH ET MAME)
<b>CHARGEMENT MODELE</b>	CHARGEME MMODEL ( <b>THERMIQUE ET CONVECTION ET MECANIQUE</b> ) <i>Cet indice détecte le couplage.</i>
<b>MASSE_CONSTANTE</b>	(éventuellement) RIGIDITE (MACAD)
<b>TALPHA_REFERENCE</b>	CHPOINT
<b>TEMPS_CALCULES</b>	LISTREEL
<b>PAS_MAX</b>	FLOTTANT (pas de temps maximal pour la thermique)
<b>TEMPERATURES</b>	<b>TABL</b> de valeur TABLE
<b>TEMPERATURES . 0</b>	CHPOINT de températures initiales
<b>PROCEDURE_THERMIQUE</b>	<b>DUPONT LINEAIRE NONLINEAIRE</b>
<b>RAYONNEMENT</b>	(éventuellement) <b>TABL</b> de valeur TABLE
<b>PHASE</b>	(éventuellement) <b>TABL</b> de valeur TABLE

11<sup>ème</sup> étape

Lancer **PASAPAS** avec la TABLE ainsi construite.

Les contraintes calculées dans PASAPAS sont les contraintes vraies (ie il ne faut pas soustraire les contraintes calculés par BSIGma), bien entendu si les contraintes sont prises dans la table (avec PECHE par exemple) et non calculées à partir des déplacements.

## 5.5 THERMO-ELASTICITE NON LINEAIRE

Les coefficients élastiques dépendent de la température (qui évolue). Dans la suite, on appelle TT le CHPOINT de température (en général calculé) à un instant donné. On suppose que l'ensemble des instants est stocké dans une TABLE (TABT), c'est à dire qu'elle est le résultat d'un calcul thermique avec CASTEM2000®.

Opérateurs utilisés : **CHARGement, ET, EVOLution, PASAPAS, PROGression.**

### 1<sup>ère</sup> étape

Définir les variations des coefficients élastiques (E,  $\nu$ ,  $\alpha$ ) et pour cela définir l'abscisse, puis l'ordonnée (objet de type LISTREEL), puis la fonction (objet de type EVOLUTIO).

COEABSC = **PROG** abscisses par ordre croissant ;

COEORDO = **PROG** ordonnées par ordre croissant ;

COEVOLU = **EVOL MANU** 'nomabscisse' COEABSC  
'nomordonnée' COEORDO ;

la dimension des deux LISTREEL doit être la même  
nomabscisse doit être T ou TINF ou TSUP.

nomordonnée doit être pris dans le nom des composantes du

MATERIAU

### 2<sup>ème</sup> étape

Définir le MCHAML matériau

MA1 = **MATE MO1 YOUN** coevoluy **NU** coevolun **ALPH** coevolua (cara) ;

### 3<sup>ème</sup> étape

Définir le chargement d'origine thermique et éventuellement le chargement d'origine mécanique

CHTH = **CHAR T** (TABT . **TEMPS**) (TABT . **TEMPERATURES**) ;

ou CHTH = **CHAR T TT EVT** ;

CHME = **CHAR MECA FF EVM** ;

CHCE = **CHAR DIMP FC ECM** ;

### 4<sup>ème</sup> étape

Remplir la TABLE pour **PASAPAS** et en particulier les indices

**CHARACTERISTIQUES** MCHAML de matériau

**CHARGEMENT** CHARGEME (assemblage par **ET** de CHTH,  
CHCE et CHME)

**TALPHA\_REFERENCE** CHPOINT

### 5<sup>ème</sup> étape

Lancer **PASAPAS** avec la TABLE ainsi construite.

Les contraintes calculées dans PASAPAS sont les contraintes vraies (ie il ne faut pas soustraire les contraintes calculés par BSIGma), bien entendu si les contraintes sont prises dans la table (avec PECHE par exemple) et non calculées à partir des déplacements.

## 5.6 ELASTO-PLASTICITE

Opérateurs utilisés : **CHARGement, ET, EVOLution, MATERiau, MODEle, PASAPAS, PROGression.**

### 1<sup>ère</sup> étape

Définir le MMODEL mécanique

MOME = **MODE MAIL1 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE**  
(nomélément) ;

### 2<sup>ème</sup> étape

Définir le MCHAML matériau mécanique et donc la courbe de traction

ABSEPS = **PROG** epsilon total ;

ORDSIG = **PROG** sigma ;

COURTRAC = **EVOL MANU** nomabs ABSEPS nomord ORDSIG ;

MAME = **MATE MOME YOUN E NU v TRAC** COURTRAC (cara) ;

*La courbe de traction doit contenir le point ( $\sigma=0, \varepsilon=0$ ). Le rapport  $\sigma_1/\varepsilon_1$  doit être égal à E. La pente initiale doit être la plus forte.*

### 3<sup>ème</sup> étape

Définir les chargements mécaniques

CHME = **CHAR MECA** FFME EVME ;

CHCE = **CHAR DIMP** FCME ECME ;

### 4<sup>ème</sup> étape

Remplir les indices de la table pour **PASAPAS** en particulier

**BLOCAGES\_MECANIQUES** RIGIDITE Assemblage des conditions aux limites mécaniques (CLME)

**CHARACTERISTIQUES** MCHAML Assemblage des MCHAML de matériau (MAME)

**CHARGEMENT** CHARGEME

**MODELE** MMODEL

### 5<sup>ème</sup> étape

Lancer **PASAPAS** avec la TABLE ainsi construite.

## 5.7 THERMO-ELASTO-PLASTICITE

Si les coefficients élastiques dépendent de la température (qui évolue), on se reportera à l'exemple 5.5 THERMO-ELASTICITE NON LINEAIRE (page 36). Dans la suite, on s'intéresse aux variations de la courbe de traction en fonction de la température. On appelle TT le CHPOINT de température (en général calculé) à un instant donné. On suppose que l'ensemble des instants est stocké dans une TABLE (TABT), c'est à dire qu'elle est le résultat d'un calcul thermique avec CASTEM2000®.

Opérateurs utilisés : **CHARGement, ET, EVOLution, MATERiau, MODEle, NUAGe, PASAPAS, PROGression.**

1<sup>ère</sup> étape

Définir le modèle

MO1 = **MODE MAIL1 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
ISOTROPE** (nomélément) ;

Dans le cas PLASTIQUE PARFAIT

MO1 = **MODE MAIL1 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
PARFAIT** (nomélément) ;

2<sup>ème</sup> étape

Définir les variations de la courbe de traction et pour cela définir les abscisses, puis les ordonnées (objet de type LISTREEL), puis la fonction (objet de type EVOLUTIO), puis la variation (objet de type NUAGE).

Définition des déformations

COEABSC = **PROG** abscisses par ordre croissant ;  
.....

Définition des contraintes

COEORDO = **PROG** ordonnées par ordre croissant ;  
.....

Définition des courbes de traction

COEVOLU = **EVOL MANU** eps COEABSC sig COEORDO ;  
la dimension des deux LISTREEL doit être la même et toutes les  
courbes de tractions doivent avoir le même nom d'abscisse et le même  
nom d'ordonnée.

*La courbe de traction doit contenir le point ( $\sigma=0, \varepsilon=0$ ) pour toutes les températures.*

*Le rapport  $\sigma_1/\varepsilon_1$  doit être égal à E pour toutes les températures.*

Définition des variations

COVARIA = **NUAG COMP T** valeurs des températures  
**COMP TRAC COEVOLU** ..... ;

Il doit y avoir autant de valeurs de température (FLOTTANT) que  
d'objet de type EVOLUTIO et toutes les températures atteintes doivent  
être décrites (il n'y a pas extrapolation mais interpolation dans le  
réseau).

Dans le cas PLASTIQUE PARFAIT

Définir la variation de la limite élastique et pour cela définir les abscisses, puis les ordonnées (objet de type LISTREEL), puis la fonction (objet de type EVOLUTIO).

COEABSC = **PROG** abscisses par ordre croissant ;



## 5.8 THERMO-ELASTO-PLASTICITE COUPLEE

On n'utilise pas le même maillage pour la thermique et pour la mécanique. On suppose que la thermique est linéaire (sinon voir le volume THERMIQUE DES STRUCTURES).

Opérateurs utilisés : *CAPAcité, CHARGement, ET, EVOLution, LUMPer, MODEle, NUAGe, PASAPAS, PROGression.*

1<sup>ère</sup> étape

Définir le MMODEL thermique

MOTH = **MODE MAIL1 THERMIQUE ISOTROPE** (nomélément) ;

2<sup>ème</sup> étape

Définir le MMODEL mécanique

MOME = **MODE MAIL1 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE**  
(nomélément) ;

Si l'on désire faire le calcul mécanique sur un autre maillage, on l'indiquera par l'indice PROJECTION dans PASAPAS. Par exemple si le type d'élément change (ie devient quadratique), on mettra

MAIL2 = **CHAN mail1 QUAD** ;

MOME = **MODE MAIL2 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE**  
(nomélément) ;

On peut aussi définir le maillage mécanique en élément quadratique, puis utiliser CHAN LINE pour le maillage thermique.

3<sup>ème</sup> étape

Définir le MCHAML matériau thermique

MATH = **MATE MOTH K valk 'C' valcp RHO valro** (cara) ;

4<sup>ème</sup> étape

Définir le MCHAML matériau mécanique. On suppose que le module d'élasticité et la courbe de traction dépendent de la température.

*module d'Young en fonction de la température*

YYG = **PROG** ... ;

XYG = **PROG** ... ;

EVYG = **EVOL MANU T XYG YOUN YYG** ;

*courbe de traction à  $\theta_1$*

adef1 = **PROG** ... ;

asig1 = **PROG** ... ;

ev1 = **EVOL MANU ep1 adef1 si1 asig1** ;

*La courbe de traction doit contenir le point ( $\sigma=0, \varepsilon=0$ ) pour toutes les températures. Le rapport  $\sigma_1/\varepsilon_1$  doit être égal à E pour toutes les températures.*

*courbe de traction à  $\theta_i$*

.....

*Toutes les courbes de tractions doivent avoir le même nom d'abscisse et le même nom d'ordonnée.*



*courbe de traction en fonction de la température*

**NUTRAC = NUAG COMP T  $\theta_1$  ...  $\theta_i$  Les  $\theta_i$  doivent être des FLOTTANT  
COMP TRAC ev1 ... evi ;**

*Il doit y avoir autant de valeurs de température (FLOTTANT) que  
d'objet de type EVOLUTIO et toutes les températures atteintes doivent  
être décrites (il n'y a pas extrapolation mais interpolation dans le  
réseau).*

*définition du matériau*

**MAME = MATE MOME YOUN EVYG NU v ALPH  $\alpha$  TRAC NUTRAC  
(cara) ;**

Le calcul mécanique se fera en statique (i.e. on ne tient pas compte des termes d'inertie)

5<sup>ème</sup> étape (éventuellement)

Calculer la matrice de capacité diagonalisée

**MACAP = CAPA MOME MOTH ;**

**MACAD = LUMP MACAP ;**

L'objet MACAD sera mis dans l'indice **MASSE\_CONSTANTE** de la TABLE pour **PASAPAS**. Voir le volume THERMIQUE DES STRUCTURES et penser dans ce cas à modifier la procédure TRANSLIN.

6<sup>ème</sup> étape

Définir les conditions aux limites thermiques (CLTH)

7<sup>ème</sup> étape

Définir les conditions aux limites mécaniques (CLME)

8<sup>ème</sup> étape

Définir les chargements thermiques

**CHTH = CHAR mot FFTH EVTH ;  
mot Q ou T ou TE**

9<sup>ème</sup> étape (éventuellement)

Définir les chargements mécaniques

**CHME = CHAR MECA FFME EVME ;  
CHCE = CHAR DIMP FCME ECME ;**

10<sup>ème</sup> étape

Remplir les indices de la table pour **PASAPAS** en particulier

<b>BLOCAGES_MECAIQUES</b>	RIGIDITE Assemblage des conditions aux limites mécaniques (CLME)
<b>BLOCAGES_THERMIQUES</b>	RIGIDITE Assemblage des conditions aux limites thermiques (CLTH)
<b>CARACTERISTIQUES</b>	MCHAML Assemblage des MCHAML de matériau (MATH ET MAME)
<b>CHARGEMENT</b>	CHARGEME (thermiques et mécaniques)
<b>MODELE</b>	MMODEL ( <b>THERMIQUE ET</b>

<b>MASSE_CONSTANTE</b>	<b>CONVECTION ET MECANIQUE)</b>
<b>TALPHA_REFERENCE</b>	<i>Cet indice détecte le couplage.</i>
<b>TEMPS_CALCULES</b>	(éventuellement) <b>RIGIDITE (MACAD)</b>
<b>PAS_MAX</b>	<b>CHPOINT</b>
<b>TEMPERATURES</b>	<b>LISTREEL</b>
<b>TEMPERATURES . 0</b>	<b>FLOTTANT</b> (pas de temps maximal pour la thermique)
<b>PROCEDURE_THERMIQUE</b>	<b>TABLE</b>
<b>RAYONNEMENT</b>	<b>CHPOINT</b> de températures initiales
<b>PHASE</b>	<b>LINEAIRE</b> (ou <b>NONLINEAIRE</b> ou <b>DUPONT</b> )
<b>PROJECTION</b>	(éventuellement) <b>TABLE TABL</b>
	(éventuellement) <b>TABLE</b>
	<b>LOGIQUE VRAI</b>

11<sup>ème</sup> étape

Lancer **PASAPAS** avec la **TABLE** ainsi construite.

Les contraintes calculées dans **PASAPAS** sont les contraintes vraies (ie il ne faut pas soustraire les contraintes calculés par **BSIGma**), bien entendu si les contraintes sont prises dans la table (avec **PECHE** par exemple) et non calculées à partir des déplacements.

## 5.9 FLUAGE

Même si l'inertie n'intervient pas les temps sont ici des vrais temps. La loi de fluage Norton est de la forme  $\varepsilon_F = af1 * \sigma^{af2} * t^{af3}$

Opérateurs utilisés : **CHARGement, ET, EVOLution, MODEle, MATERiau, PASAPAS, PROGression.**

1<sup>ère</sup> étape

Définir le MMODEL

MO1 = **MODE MAIL1 MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE  
NORTON** (nomélément) ;

2<sup>ème</sup> étape

Définir le MCHAML matériau

MA1 = **MATE MO1 YOUN E NU v AF1 af1 AF2 af2 AF3 af3 SMAX sm**  
(cara) ;

3<sup>ème</sup> étape

Définir les chargements mécaniques ou thermiques

CHME = **CHAR MECA FFME EVME** ;  
CHCE = **CHAR DIMP FCME ECME** ;  
CHTH = **CHAR T FPTH EVTH** ;

4<sup>ème</sup> étape

Remplir les indices de la table pour **PASAPAS** en particulier

<b>BLOCAGES_MECANQUES</b>	RIGIDITE Assemblage des conditions aux limites mécaniques (CLME)
<b>CHARACTERISTIQUES</b>	MCHAML Assemblage des MCHAML de matériau (MAME)
<b>CHARGEMENT</b>	CHARGEME
<b>CONTRAINTES</b>	MOT TABL
<b>CONTRAINTES . 0</b>	MCHAML
<b>DEPLACEMENTS</b>	MOT TABL
<b>DEPLACEMENTS . 0</b>	CHPOINT
<b>MODELE</b>	MMODEL

5<sup>ème</sup> étape

Lancer **PASAPAS** avec la TABLE ainsi construite.

## 5.10 GRANDS DEPLACEMENTS

Opérateurs utilisés : **CHARGement, ET, EVOLution, MATERiau, MODELe, PASAPAS, PROGression.**

1<sup>ère</sup> étape

Définir le MMODEL mécanique

MOME = **MODE MAIL1 MECANIQUE ELASTIQUE** (nomélément) ;

2<sup>ème</sup> étape

Définir les chargements mécaniques (ou thermiques)

CHME = **CHAR MECA FFME EVME** ;

CHCE = **CHAR DIMP FCME ECME** ;

3<sup>ème</sup> étape

Remplir les indices de la table pour **PASAPAS** en particulier

**BLOCAGES\_MECANIQUE**      RIGIDITE Assemblage des conditions aux limites mécaniques (CLME)

**CARACTERISTIQUES**      MCHAML Assemblage des MCHAML de matériau (MAME)

**CHARGEMENT**      CHARGEME

**GRANDS\_DEPLACEMENTS**      MOT VRAI

**GRANDES\_ROTATIONS**      MOT VRAI

**MODELE**      MMODEL

4<sup>ème</sup> étape

Lancer **PASAPAS** avec la TABLE ainsi construite.

## 5.11 CAS DES ELEMENTS JOINTS

Opérateurs utilisés : **CHARGement, ET, EVOLution, MATERiau, MODEle, PASAPAS, PROGression.**

### 1<sup>ère</sup> étape

Maillage du joint (voir volume MAILLAGE)

utilisation de l'opérateur RACCord en bidimensionnel pour créer les éléments RAC2 (linéaires) entre faces de TRI3 et/ou QUA4 ou créer les éléments RAC3 (quadratiques) entre faces de TRI6 et/ou QUA8.

rc = **RACC** s1 s2 crit ;

utilisation de l'opérateur LIAison en tridimensionnel pour créer les éléments LIA3 (linéaires) entre faces triangulaires de PRI6, PYR5, TET4 ou créer les éléments LIA4 (linéaires) entre faces quadrangulaires de CUB8, PRI6, PYR5.

rc = **LIAI** v1 v2 crit ;

### 2<sup>ème</sup> étape

Définir le MMODEL mécanique et joint

MOME = **MODE MAIL1 MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE**  
(nomélément) ;

MOMJ = **MODE MAILJ MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE**  
**JOINT** nomjoint ;

nomjoint (obligatoire) à choisir entre JOI2 ou JOI3 en bidimensionnel et JOT3 ou JOI4 en tridimensionnel

### 3<sup>ème</sup> étape

Définir le MCHAML matériau mécanique et donc la courbe de traction et joint

ABSEPS = **PROG** epsilontotal ;

ORDSIG = **PROG** sigma ;

COURTRAC = **EVOL MANU** nomabs ABSEPS nomord ORDSIG ;

MAME = **MATE MOME YOUN E NU** v **TRAC** COURTRAC (cara) ;

*La courbe de traction doit contenir le point ( $\sigma=0, \varepsilon=0$ ). Le rapport  $\sigma_1/\varepsilon_1$  doit être égal à E.*

MAMJ = **MATE MOMJ KS** ks **KN** kn **COHE** cohe ;

### 3<sup>ème</sup> étape

Définir les chargements mécaniques

CHME = **CHAR MECA** FFME EVME ;

CHCE = **CHAR DIMP** FCME ECME ;

### 4<sup>ème</sup> étape

Remplir les indices de la table pour **PASAPAS** en particulier

**BLOCAGES\_MECANQUES** RIGIDITE Assemblage des conditions aux limites mécaniques (CLME)

**CHARACTERISTIQUES** MCHAML Assemblage des MCHAML de matériau (MAME)

**CHARGEMENT** CHARGEME

**MODELE**

**MMODEL**

5<sup>ème</sup> étape

Lancer PASAPAS avec la TABLE ainsi construite.

## 5.12 Consolidation linéaire des sols

Le problème étudié utilise la procédure PASAPAS bien que le comportement soit linéaire et dynamique (on pourrait bien entendu le traiter en grand déplacement). On cherche à résoudre le système :

$$\begin{aligned} \mathbf{KX} + \mathbf{LP} &= \mathbf{F} \\ \mathbf{HX} + \mathbf{DP} &= \mathbf{Q} \end{aligned}$$

Exemple de la consolidation unidimensionnelle de Terzaghi. La solution analytique est de la forme:

$$U(y,t) = -\frac{p_0 \cdot h}{\lambda + 2\mu} \left\{ \frac{y}{h} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{\pi^2 (2n+1)^2} e^{-\frac{\pi^2 (2n+1)^2}{h^2} \frac{\lambda+2\mu}{k} kt} \cos \left[ \frac{\pi}{2} (2n+1) \left(1 - \frac{y}{h}\right) \right] \right\}$$

$$P(y,t) = \frac{4p_0}{\pi} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} e^{-\frac{\pi^2 (2n+1)^2}{h^2} \frac{\lambda+2\mu}{k} kt} \sin \left[ \frac{\pi}{2} (2n+1) \left(1 - \frac{y}{h}\right) \right] \right\}$$

$\lambda, \mu$  coefficients de LAME  
 $p_0$  pression  
 $h$  hauteur  
 $k$  coefficient de perméabilité

Opérateurs utilisés : **BLO**Quer, **CHAR**gement, **ET**, **EVOL**ution, **MATER**iau, **MODE**le, **PASAPAS**, **PERM**éabilité, **PRES**sion, **PROG**ression.

### OPTI DIME 2 ELEM QUA8 MODE PLAN DEFO ;

```
H = 10. ;
p1 = 0. 0. ; p2 = lx 0. ; p3 = lx h ; p4 = 0. h ;
l12 = p1 D 1 p2 ;
l23 = p2 D p3 DINI 1. DFIN .1 ;
l34 = p3 D 1 p4 ;
l41 = p4 D p1 DINI .1 DFIN 1. ;
toto = DALL l12 l23 l34 l41 PLAN ;
mo = MODE toto POREUX ;
py = 7e9 ; pn = 0.4 ; pm = 1.e18 ; pc = 1. ; pp = 1e-9 ; pv = 1. ;
mat = MATE mo YOUN py NU pn MOB pm COB pc PERM pp VISC pv ;
bl1 = BLOQ UY l12 ;
bl2 = BLOQ UX (l23 et l41) ;
blp = BLOQ P l34 ;
p0 = 4e3 ;
fpp = PRES MASS mo p0 l34 ;
per = PERM mat mo ;
ev = EVOL MANU t (PROG 0. 100. ) f (PROG 1. 1. ) ;
cha = CHAR MECA fpp ev ;
letemp = PROG 0. PAS 1e-2 1. ;
ta = TABL ;
ta . MODELE = mo ;
ta . CARACTERISTIQUES = mat ;
```

ta . **BLOCAGES\_MECAIQUES** = bl1 et bl2 et blp ;  
ta . **TEMPS\_CALCULES** = letemp ;  
ta . **CHARGEMENT** = cha ;  
ta . **CONSOLIDATION** = **VRAI** ;  
ta . **PERMEABILITE** = per ;  
\*ta . **GRANDS\_DEPLACEMENTS** = **VRAI** ;  
**PASAPAS** ta ;



### 5.13 CONSOLIDATION ELASTOPLASTIQUE DES SOLS

Dans le cas de la consolidation, le comportement mécanique peut être élastoplastique. Il suffit de spécifier le modèle, par exemple:

mo = **MODE** toto **POREUX PLASTIQUE PARFAIT** ;

mat = **MATE** mo **YOUN** py **NU** pn **MOB** pm **COB** pc **PERM** pp **VISCO** pv **SIGY** sy ;

Les modèles disponibles sont:

- PLASTIQUE CINEMATIQUE
- PLASTIQUE DRUCKER\_PARFAIT
- PLASTIQUE DRUCKER\_PRAGER
- PLASTIQUE ISOTROPE
- PLASTIQUE PARFAIT

## 6. CALCULS DYNAMIQUES LINEAIRES MECANIQUES

lire d'abord le Tome 1

### 6.1 INTEGRATION DIRECTE

Le schéma temporel est implicite pour résoudre l'équation

$$M \ddot{X}(t) + C \dot{X}(t) + KX(t) = F(t) + \int B^T D \varepsilon_0 - \int B^T \sigma_0$$

#### AMORTISSEMENT

Calcul de la matrice d'amortissement. Elle est de la forme  $\alpha K + \beta M$ .  $\alpha$  et  $\beta$  sont calculés par

$$\alpha = \frac{2(\xi_1 \omega_1 - \xi_2 \omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 \omega_2 (\xi_2 \omega_1 - \xi_1 \omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

- $\omega_1$  première pulsation propre de la structure non amortie
- $\omega_2$  deuxième pulsation propre de la structure non amortie
- $\xi_1$  facteur d'amortissement sur le premier mode
- $\xi_2$  facteur d'amortissement sur le deuxième mode
- $\alpha$  a la dimension d'un temps
- $\beta$  a la dimension d'une fréquence

$\alpha$  négligeable et  $\beta$  prépondérant permet de filtrer les basses fréquences,  $\beta$  négligeable et  $\alpha$  prépondérant permet de filtrer les hautes fréquences.

On peut aussi choisir  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction du contenu fréquentiel d'une sollicitation. Par exemple, si l'on veut amortir les fréquences supérieures à  $f_c$ , on choisira

$$\alpha = \frac{\xi}{2\pi f_c}$$

$$\beta = 0$$

A l'inverse, si l'on veut amortir les fréquences inférieures à  $f_c$ , on choisira

$$\alpha = 0$$

$$\beta = 2\pi \xi f_c$$

AM1 = ( $\alpha * K$ ) ET ( $\beta * M$ ) ;

K RIGIDITE créé par RIGI.

M RIGIDITE créé par MASS.

AM1 RIGIDITE

On peut aussi utiliser l'opérateur MASSe ou l'opérateur RIGIdité (avec un matériau adapté) pour calculer l'objet AM1.

(voir MASSe, RIGIdité)

#### CHARGEMENT

Crée un objet de type CHARGEME selon deux possibilités :

CH1 = **CHAR** mot FT EV;

mot MOT de valeur **CONT, DIMP, MECA** ou **PSUI** ou **T**

FT CHPOINT de forces (voir le Tome 1). Dans le cas PSUI, il ne doit avoir qu'une composante, dans le cas CONT, c'est un MCHAML de type CONTRAIN

EV EVOLUTIO

CH1 = **CHAR** mot ttab ftab;

mot MOT de valeur **CONT**, **DIMP**, **MECA** ou **PSUI** ou **T**

ttab TABL de FLOTTANT indiquée par des ENTIER de 0 à n. On doit avoir ttab . 0 = 0. ;

ftab TABL de CHPOINT (ou de MCHAML dans le cas CONT) indiquée par les mêmes ENTIER de 0 à n et contenant les chargements aux instants figurant dans ttab.

Cette donnée est obligatoire même s'il n'y a qu'une vitesse initiale.

(voir *BSIGma*, *CNEQuivalent*, *DEPImposé*, *EVOLution ci dessous*, *FORCe*, *MOMEnt*, *PRESsion*)

### **DIMEnsion**

Permet d'obtenir la dimension d'une TABLE ou d'un LISTREEL. Utile pour post-traiter les calculs issus de PASAPAS.

NN = **DIME** TAB1.**TEMPS** ;

TAB1.**TEMPS** TABLE contenant les temps conservés par PASAPAS

NN ENTIER

(voir *opérateurs de post-traitement*)

### **EVOLution**

Permet de définir une variation

EV = **EVOL** MANU nomabs lista nomord listo ;

EV EVOLUTIO

(voir *CHARgement ci-dessus*)

### **FRONABS**

Création de frontières absorbantes pour l'interaction sol-structure. Cette procédure ne s'utilise en l'état (ce qui veut dire que l'on peut éventuellement la modifier) qu'en 2D avec des éléments à interpolation quadratique (**OPTI DIME 2 ELEM QUA8** ;).

TAB1 = **TABL** ;

AMABS = **FRONABS** TAB1 (mot) ;

TAB1	TABLE contenant les indices suivants
<b>FRONTIERE</b>	MAILLAGE (le maillage de SEG3 doit être parallèle aux axes)
<b>MASSE_VOLUMIQUE</b>	FLOTTANT (masse volumique du sol)
<b>POISSON</b>	FLOTTANT (coefficient de Poisson du sol)
<b>YOUNG</b>	FLOTTANT (module d'Young du sol)
mot	MOT (type de la frontière) <b>LYSMER</b> (par défaut) ou <b>WHITE</b>
AMABS	RIGIDITE (amortissement)

### **IMPOser**

Permet de créer un maillage d'élément de contact pour remplir l'indice CONTACT dans PASAPAS. Il ne fonctionne qu'avec des éléments SEG2. Les lignes doivent se tourner le dos au sens des normales. Pour le vérifier, on peut utiliser la procédure PATIN décrite dans le volume DESCRIPTION du LANGAGE ou l'opérateur VSURface décrit dans le volume VERIFICATION des DONNEES.

```
MC = IMPO MAIL L1 L2 ;
      L1   MAILLAGE (ligne)
      L2   MAILLAGE (ligne)
      MC   MAILLAGE
```

### INDEx

Crée une TABLE qui contient les indices d'une TABLE

```
TIND = INDE TAB1 ;
      TAB1 TABLE
      TIND TABLE
```

*(voir TABLE dans le chapitre langage)*

### LUMPer

Permet de diagonaliser la matrice de masse. Dans PASAPAS, il faut utiliser l'indice MASSE\_CONSTANTE sinon la matrice de masse est calculée dans PASAPAS (voir Tome 1).

```
LAIM = LUMP MAIM ;
      MAIM RIGIDITE
      LAIM RIGIDITE
      ou
laim = LUMP MA MO ;
      MA   MCHAML de matériau (composantes RHO et cara)
      MO   MMODEL
      laim RIGIDITE
```

*(voir MASSE)*

### MASSE

Calcul des matrices de masse. La forme la plus simple est (si MA représente l'ensemble des matériaux - on a besoin de  $\rho$  et éventuellement des caractéristiques géométriques - et MO l'ensemble des modèles).

```
maim = MASS MA MO ;
      MA   MCHAML de matériau (composantes RHO et cara)
      MO   MMODEL
      maim RIGIDITE
```

Elle est calculée automatiquement dans PASAPAS sauf si elle est « lumpée »

*(voir LUMPer)*

### M\_DAMP\_K

### M\_DAMPIN

## PASAPAS

Procédure de calculs dynamiques

**PASAPAS TAB1 ;**

TAB1 TABLE contenant les données et les résultats. Elle doit être déclarée comme telle avant utilisation

TAB1 = **TABL ;**

De même que (éventuellement)

TAB1.**CONTRAINTE**S = **TABL ;**

TAB1.**DEPLACEMENT**S = **TABL ;**

TAB1.**VITESSE**S = **TABL ;**

Données (les indices suivants sont à renseigner avant l'utilisation de

PASAPAS)

TAB1.**AMORTISSEMENT**

RIGIDITE

TAB1.**BLOCAGES\_MECA**NIQUES

RIGIDITE

TAB1.**CARACTERISTIQUES**

MCHAML

TAB1.**CHARGEMENT**

CHARGEME

TAB1.**CONTACT**

MAILLAGE

TAB1.**CONTRAINTE**S . 0

MCHAML. Les forces équivalentes sont calculées sauf si elles existent dans CHAR CONT.

TAB1.**DEPLACEMENT**S . 0

CHPOINT

TAB1.**DYNAMIQUE**

**VRAI**

TAB1.**MASSE\_CONSTANTE**

RIGIDITE

TAB1.**MODELE**

MMODEL (le modèle LIQUIDE n'est pas pris en compte)

TAB1.**TEMPS\_CALCULES**

LISTREEL

Pour le calcul du pas de temps (dt), on choisira une fraction (par exemple 0.2) de Min (T<sub>s</sub>, T<sub>c</sub>) avec

T<sub>s</sub> plus petite période propre de la structure

T<sub>c</sub> plus petite période propre contenue dans le chargement

TAB1.**TEMPS\_SAUVES**

LISTREEL

TAB1.**VITESSE**S . 0

CHPOINT

Résultats (les indices suivants sont renseignés par PASAPAS)

TAB1.**DEPLACEMENT**S

TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT

TAB1.**CONTRAINTE**S

TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML

TAB1.**REACTIONS**

TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT

TAB1.**TEMPS**

TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de FLOTTANT

TAB1.**VITESSE**S

TABLE (indicée par le

numéro du pas sauvé) de  
CHPOINT

Les contraintes calculées dans PASAPAS sont les contraintes vraies (ie il ne faut pas soustraire les contraintes calculés par THETA), bien entendu si les contraintes sont prises dans la table (avec PECHE par exemple) et non calculées à partir des déplacements. De même dans le cas des contraintes initiales, il ne faut pas les ajouter.

*(voir TABLE dans le volume LANGAGE)*

## 6.2 SUPERPOSITION MODALE

*lire d'abord l'exemple MODES PROPRES (Voir TOME 1)*

Le schéma temporel est explicite pour résoudre l'équation

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t)$$

par projection sur une base modale.

### AMORtissement

AM = AMOR TV1 LAM ;

TV1	TABLE de SOLUTION créée par VIBR (option TBAS)
LAM	LISTREEL contenant les pourcentages d'amortissement (autant que de modes dans TV1)
AM	AMORMODA

*(voir PROGression, VIBRation)*

### CHARgement

### DYNAMODE

### DYNE

Permet d'effectuer le calcul par un algorithme explicite

TA1 = DYNE DE\_VOGELAERE TV1 TCH (TAM) (TIN) (TLI) n pas dt ;

TA1	TABLE contenant les indices
	<b>SOUSTYPE</b> MOT
	<b>TEMPS_DE_SORTIE</b> LISTREEL
	<b>REPRISE</b> TABLE contenant les informations pour un éventuelle reprise (par exemple pour changer de pas de temps).
	i TABLE contenant les contributions de chaque mode au pas i pour les DEPLACEMENT, VITESSE, ACCELERATION.
TV1	TABLE de SOLUTION créée par VIBR (option TBAS) ou par TRAD
TIN	TABLE de CHPOINT contenant les déplacements ou les vitesses initiaux.
	TIN = TABL INITIAL ;
	TIN . DEPLACEMENT = chd ; chd CHPOINT
	TIN . VITESSE = chv ; chv CHPOINT
TLI	TABLE de TABLE contenant les liaisons TLI = TABL LIAISON ;

TCH	TABLE créée par l'utilisateur TCH = <b>TABL CHARGEMENT</b> ; TCH . <b>BASE_A</b> = CHBA ; CHBA CHARGEME créé par PJBA
TAM	TABLE créée par l'utilisateur TCH = <b>TABL AMORTISSEMENT</b> ; TCH . <b>AMORTISSEMENT</b> = AM ; AM AMORMODA créé par AMOR
npas	ENTIER (nombre de pas)
dt	FLOTTANT (pas de temps). npas x dt doit être strictement inférieur au temps final du chargement

Pour le calcul du pas de temps (dt), on choisira une fraction (par exemple 0.2) de Min ( $T_s, T_c$ ) avec

$T_s$  plus petite période propre de la structure

$T_c$  plus petite période propre contenue dans le chargement

(voir *AMORtissement, PJBAs, VIBRation*)

## EVOLution

Définition du chargement

### EVOL MANU

Création d'un objet de type EVOLUTIO pour posttraiter la solution recombinaée.

### EVOL RECO

### EVOL SOLU

## PJBAs

CHBA = **PJBA** CH1 TV1 ;

CH1 CHARGEME

TV1 TABLE de SOLUTION créée par VIBR (option TBAS)

CHBA CHARGEME

(voir *CHARgement, VIBRation*)

## PSMMode

Permet de calculer les pseudo-modes.

## RECOmbiner

DEP = **RECO** TA1 TV1 t mot ;

DEP CHPOINT

TA1 TABLE (créée par DYNE)

TV1 TABLE de SOLUTION créée par VIBR (option TBAS)

t FLOTTANT (temps)

mot MOT (DEPLacement ou VITEsse ou ACCElération ou CONTrainte ou REACtion)

(voir *DYNE, VIBRation*)



## **RESolution**

### **TRADuire**

L'opérateur TRADuire permet de transformer l'objet SOLUTION en objet TABLE.

TB1 = **TRAD** US ;

TB2 = **TABL** **BASE\_MODAL**E ;

TB2 . **MODES** = TB1 ;

### 6.3 METHODE SPECTRALE

*lire d'abord l'exemple MODES PROPRES (Voir Tome 1)*

#### BASE

Définition des modes et des pseudo-modes statiques

BAS1 = **BASE** STRU1 (AT1) (SOL1) (SOL2) ;

BAS1          BASEMODA

STRU1         STRUCTUR

SOL1          SOLUTION créé par VIBR

SOL2          SOLUTION créé par VIBR

#### SISSI

Procédure permettant de fournir les données pour un calcul par la méthode spectrale avec la procédure **SISSI2**. Il suffit de faire

TT = **SISSI** ;

puis répondre aux questions après avoir entré un caractère quelconque pour commencer. Ensuite, les questions concernent:

La base modale: on veut un objet de type **BASEMODA** (construit par **VIBR**)

Le supportage: on veut un objet de type **MAILLAGE**

L'amortissement: on veut un objet de type **LISTREEL** (amortissement constant par modes) ou de type **TABLE** (amortissement défini par zones)

L'excitation: on veut un objet de type **EVOLUTIO** et un objet de type **LISTREEL**

La règle de combinaison: on veut un objet de type **MOT** (SRSS, CQC KUIR, CQC ROSB ou DPC) pour les modes et un objet de type **MOT** (QUAD ou NWM) pour les directions

La troncature:

Les sorties: elles concernent les déplacements, les contraintes, les accélérations, les réactions

Les impressions désirées

La procédure construit la table TT nécessaire au passage dans **SISSI2**.

*La combinaison SRSS (combinaison quadratique Simple) peut être effectuée à partir d'un seul mode*

*La combinaison CQC (Combinaison Quadratique Complète der KIUREghian ou ROSenBlueth) ne peut s'effectuer que si la structure est mono-supportée.*

*La combinaison DPC (Dix Pour Cent)*

#### SISSI2

Procédure permettant d'effectuer un calcul par la méthode spectrale ou plus exactement le calcul de la réponse d'une structure à une excitation d'ensemble ou d'une structure multisupportée à une excitation des supports. La table peut être issue de SISSI ou remplie de la manière suivante.

TT = **SISSI** ;                    ou TT = **TABL** ; (puis définition des indices de TT)

TS = **SISSI2** TT ;

TT    **TABLE** construite par SISSI et qui contient les indices suivants :

**AMORT**

**TABLE**

On peut fournir un amortissement modal ou variable ou ponctuel (concentré)

<b>AMORT . CONCENTRE</b>	TABLE
<b>AMORT . CONCENTRE . X</b>	TABLE indiquée par des POINT (pi)
<b>AMORT . CONCENTRE . X . pi</b>	FLOTTANT
<b>AMORT . CONCENTRE . Y</b>	TABLE indiquée par des POINT (pi)
<b>AMORT . CONCENTRE . Y . pi</b>	FLOTTANT
<b>AMORT . CONCENTRE . Z</b>	TABLE indiquée par des POINT (pi)
<b>AMORT . CONCENTRE . Z . pi</b>	FLOTTANT
<b>AMORT . MODAL</b>	LISTREEL
<b>AMORT . VARIABLE</b>	TABLE
<b>AMORT . VARIABLE . BETA</b>	TABLE
<b>AMORT . VARIABLE . BETA . i</b>	FLOTTANT
<b>AMORT . VARIABLE . MAIL</b>	TABLE
<b>AMORT . VARIABLE . MAIL . i</b>	MAILLAGE
<b>BASE</b>	BASE_MODAL construit par <b>BASE</b>
<b>COMBI</b>	TABLE
<b>COMBI . DIRECTION</b>	MOT ( <b>QUAD</b> ou <b>NWM</b> )
<b>COMBI . FORMULE</b>	MOT ( <b>ROSB</b> ou <b>KUIR</b> ) si CQC dans COMBI.MODES
<b>COMBI . MODES</b>	MOT ( <b>CQC</b> ou <b>DPC</b> ou <b>SRSS</b> )
<b>COMBI . ROSB</b>	FLOTTANT (si FORMULE) durée de la partie forte du séisme
<b>COMBI . SUPPORT</b>	MOT ( <b>OUI</b> ou <b>NON</b> )
<b>COMBI . SUPPORT . ABS</b>	MAILLAGE
<b>COMBI . SUPPORT . ALG</b>	MAILLAGE
<b>COMBI . SUPPORT . ENVELOPPE</b>	MOT <b>NON</b> ou <b>OUI</b>
<b>COMBI . SUPPORT . QUAD</b>	MAILLAGE
<b>EXCIT</b>	TABLE
<b>EXCIT . DIFFE</b>	TABLE
<b>EXCIT . DIFFE . X</b>	TABLE
<b>EXCIT . DIFFE . Y</b>	TABLE
<b>EXCIT . DIFFE . Z</b>	TABLE
<b>EXCIT . SEISME</b>	TABLE
<b>EXCIT . SEISME . X</b>	TABLE
<b>EXCIT . SEISME . X . i</b>	TABLE
<b>EXCIT . SEISME . X . i . AMORTISSEMENT</b>	LISTREEL
<b>EXCIT . SEISME . X . i . NIVEAU</b>	FLOTTANT facultatif
<b>EXCIT . SEISME . X . i . NORME</b>	FLOTTANT facultatif
<b>EXCIT . SEISME . X . i . SPECTRE</b>	EVOLUTIO

<b>EXCIT . SEISME . Y</b>	TABLE
<b>EXCIT . SEISME . Y . i</b>	TABLE
<b>EXCIT . SEISME . Y . i . AMORTISSEMENT</b>	LISTREEL
<b>EXCIT . SEISME . Y . i . NIVEAU</b>	FLOTTANT facultatif
<b>EXCIT . SEISME . Y . i . NORME</b>	FLOTTANT facultatif
<b>EXCIT . SEISME . Y . i . SPECTRE</b>	EVOLUTIO
<b>EXCIT . SEISME . Z</b>	TABLE
<b>EXCIT . SEISME . Z . i</b>	TABLE
<b>EXCIT . SEISME . Z . i . AMORTISSEMENT</b>	LISTREEL
<b>EXCIT . SEISME . Z . i . NIVEAU</b>	FLOTTANT facultatif
<b>EXCIT . SEISME . Z . i . NORME</b>	FLOTTANT facultatif
<b>EXCIT . SEISME . Z . i . SPECTRE</b>	EVOLUTIO
<b>EXCIT . SUPPORT</b>	TABLE
<b>EXCIT . SUPPORT . X</b>	TABLE
<b>EXCIT . SUPPORT . Y</b>	TABLE
<b>EXCIT . SUPPORT . Z</b>	TABLE
<b>IMPRE</b>	TABLE
<b>IMPRE . CONT</b>	TABLE
<b>IMPRE . CONT . i</b>	
	<i>Il faut CONT dans la base modale</i>
<b>IMPRE . DEPL</b>	TABLE
<b>IMPRE . DEPL . i</b>	MOT nom de la composante ( <b>UX, UY ...</b> )
<b>IMPRE . ECRI</b>	MOT <b>NON</b> (par défaut). Si <b>OUI</b> on écrit les caractéristiques modales
<b>SORTIE</b>	TABLE
<b>SORTIE . ACCE</b>	TABLE (accélération absolue)
<b>SORTIE . ACCE . i</b>	TABLE
<b>SORTIE . ACCE . i . j</b>	TABLE
<b>SORTIE . ACCE . i . j . POINT</b>	POINT
<b>SORTIE . ACCE . i . j . COMPOSANTE</b>	MOT nom de la composante ( <b>UX, UY ...</b> )
<b>SORTIE . CONT</b>	TABLE
	<i>Il faut CONT dans la base modale</i>
<b>SORTIE . CONT</b>	TABLE
<b>SORTIE . CONT . i</b>	TABLE
<b>SORTIE . CONT . i . j</b>	TABLE
<b>SORTIE . CONT . i . j . POINT</b>	POINT
<b>SORTIE . CONT . i . j . COMPOSANTE</b>	MOT nom de la
<b>SORTIE . DEPL</b>	TABLE
<b>SORTIE . DEPL . i</b>	TABLE
<b>SORTIE . DEPL . i . j</b>	TABLE
<b>SORTIE . DEPL . i . j . POINT</b>	POINT

<b>SORTIE . DEPL . i . j . COMPOSANTE</b>	MOT nom de la composante ( <b>UX, UY ...</b> )
<b>SORTIE . REAC</b>	TABLE
<b>SORTIE . REAC . i</b>	TABLE
<b>SORTIE . REAC . i . j</b>	TABLE
<b>SORTIE . REAC . i . j . POINT</b>	POINT
<b>SORTIE . REAC . i . j . COMPOSANTE</b>	MOT nom de la composante ( <b>UX, UY ...</b> )

<b>SUPPORT</b>	MAILLAGE (si <b>EXCIT .</b> <b>SUPPORT</b> )
----------------	---

<b>TRONC</b> <i>Il faut PSMO dans la base modale</i>	MOT <b>NON</b> ou <b>OUI</b>
---	------------------------------

TS    **TABLE** contenant les résultats demandés dans TT sous la forme d'indices

L'indice '**SEISME 3D**' est rempli si l'on a demandé l'indice **COMBL.DIRECTION**

L'indice -C est rempli si l'indice j dans **SORTIE** est plus grand que 1

<b>ACCE</b>	TABLE
<b>ACCE . 'SEISME 3D'</b>	CHPOINT
<b>ACCE . 'SEISME X'</b>	CHPOINT
<b>ACCE . 'SEISME Y'</b>	CHPOINT
<b>ACCE . 'SEISME Z'</b>	CHPOINT
<b>'ACCE-C' . 'SEISME 3D'</b>	LISTREEL
<b>'ACCE-C' . 'SEISME X'</b>	LISTREEL
<b>'ACCE-C' . 'SEISME Y'</b>	LISTREEL
<b>'ACCE -C' . 'SEISME Z'</b>	LISTREEL
<b>CONT</b>	TABLE contenant les résultats au barycentre des éléments
<b>CONT . 'SEISME 3D'</b>	CHPOINT
<b>CONT . 'SEISME X'</b>	CHPOINT
<b>CONT . 'SEISME Y'</b>	CHPOINT
<b>CONT . 'SEISME Z'</b>	CHPOINT
<b>'CONT-C' . 'SEISME 3D'</b>	LISTREEL
<b>'CONT-C' . 'SEISME X'</b>	LISTREEL
<b>'CONT-C' . 'SEISME Y'</b>	LISTREEL
<b>'CONT -C' . 'SEISME Z'</b>	LISTREEL
<b>DEPL</b>	TABLE
<b>DEPL . 'SEISME 3D'</b>	CHPOINT
<b>DEPL . 'SEISME X'</b>	CHPOINT
<b>DEPL . 'SEISME Y'</b>	CHPOINT
<b>DEPL . 'SEISME Z'</b>	CHPOINT
<b>'DEPL-C' . 'SEISME 3D'</b>	LISTREEL
<b>'DEPL-C' . 'SEISME X'</b>	LISTREEL
<b>'DEPL-C' . 'SEISME Y'</b>	LISTREEL

<b>'DEPL -C'. 'SEISME Z'</b>	LISTREEL
<b>REAC</b>	TABLE
<b>REAC . 'SEISME 3D'</b>	CHPOINT
<b>REAC . 'SEISME X'</b>	CHPOINT
<b>REAC . 'SEISME Y'</b>	CHPOINT
<b>REAC . 'SEISME Z'</b>	CHPOINT
<b>'REAC-C' . 'SEISME 3D'</b>	LISTREEL
<b>'REAC-C' . 'SEISME X'</b>	LISTREEL
<b>'REAC-C' . 'SEISME Y'</b>	LISTREEL
<b>'REAC -C'. 'SEISME Z'</b>	LISTREEL

## SISSIB

Procédure permettant d'effectuer un calcul par la méthode spectrale. Il suffit de faire  
**TS = SISSIB TT ;**

<b>TT</b>	<b>TABLE</b> construite par l'utilisateur. Elle contient les indices suivants:	
	<b>STRUCTURE</b>	TABLE de <b>BASEMODA</b> construite par <b>BASE</b>
	<b>AMORTISSEMENT</b>	LISTREEL
	<b>EXCITATION</b>	TABLE
	<b>EXCITATION . i</b>	TABLE
	<b>EXCITATION . i . ACC_MAX</b>	FLOTTANT
	<b>EXCITATION . i . AMORTISSEMENT</b>	LISTREEL
	<b>EXCITATION . i . DIRECTION</b>	MOT ( <b>X</b> ou <b>Y</b> ou <b>Z</b> )
	<b>EXCITATION . i . SPECTRE</b>	EVOLUTIO
	<b>RECOMBINAISON_MODES</b>	MOT ( <b>SRSS</b> , <b>CQC</b> , <b>ROSENBLUETH</b> ou <b>DIX_POUR_CENT</b> )
	<b>RECOMBINAISON_DIRECTIONS</b>	MOT de valeur <b>QUAD</b>
	<b>DUREE</b>	FLOTTANT (facultatif sauf dans le cas <b>ROSENBLUETH</b> )
	<b>SORTIES</b>	TABLE
	<b>SORTIES . ACCELERATIONS</b>	LOGIQUE
	<b>SORTIES . CONTRAINTES</b>	LOGIQUE
	<b>SORTIES . DEPLACEMENTS</b>	LOGIQUE
	<b>SORTIES . DOMAINE</b>	MAILLAGE ou MMODEL
	<b>SORTIES . REACTIONS</b>	LOGIQUE
	<b>TRONCATURE</b>	LOGIQUE (par défaut <b>FAUX</b> )
<b>TS</b>	<b>TABLE</b> contenant les résultats demandés dans TT. Elle contient les indices suivants:	
	<b>ACCELERATIONS . X</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>X</b> )
	<b>ACCELERATIONS . Y</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>Y</b> )
	<b>ACCELERATIONS . Z</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>Z</b> )
	<b>CONTRAINTES . X</b>	MCHAML (pour

<b>CONSTRAINTES . Y</b>	l'excitation <b>X</b> MCHAML (pour l'excitation <b>Y</b> )
<b>CONSTRAINTES . Z</b>	MCHAML (pour l'excitation <b>Z</b> )
<b>DEPLACEMENTS . X</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>X</b> )
<b>DEPLACEMENTS . Y</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>Y</b> )
<b>DEPLACEMENTS . Z</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>Z</b> )
<b>REACTIONS . X</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>X</b> )
<b>REACTIONS . Y</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>Y</b> )
<b>REACTIONS . Z</b>	CHPOINT (pour l'excitation <b>Z</b> )
<b>REPONSE_TOTALE . ACCE</b>	CHPOINT
<b>REPONSE_TOTALE . CONT</b>	MCHAML
<b>REPONSE_TOTALE . DEPL</b>	CHPOINT
<b>REPONSE_TOTALE . REAC</b>	CHPOINT

## **STRUcture**

Définition

```

STRU1 = STRU RI1 MA1 ;
STRU1      STRUCTUR
RI1        RIGIDITE (raideur)
MA1        RIGIDITE (masse)

```

## 7. EXEMPLES DYNAMIQUES LINEAIRES MECANIQUES

### 7.1 INTEGRATION DIRECTE

a) Pour faire une reprise avec PASAPAS

Soit TAB1 la TABLE qui est passée dans **PASAPAS**.

PREMIERE METHODE

Sans sortir de CASTEM2000®

DEUXIEME METHODE

Après sortie de CASTEM2000® où l'on a fait une étape de sauvetage des résultats:

**SAUV TAB1 ;**

On fait donc une reprise:

**REPR ;**

Puis, dans les deux cas, il suffit de choisir l'instant de reprise (par défaut, c'est le dernier sauvé) et d'étendre certaines valeurs de la table .

TAB1 . **REPRISE** = ;

TAB1 . **TEMPS\_CALCULES** = **PROG** tini **PAS**  $\Delta t$  tfin ;

TAB1 . **TEMPS\_SAUVES** = **PROG** tempssauvés ;

Et de relancer

**PASAPAS TAB1 ;**

b)



## 7.2 SUPERPOSITION MODALE

Pour le calcul des modes propres, on se reportera au Tome 1.

### a) Influence des modes propres

On rappelle que l'influence des modes propres sur une réponse s'évalue grâce au concept de masse modale. On définit  $M_{ix}$ ,  $M_{iy}$ ,  $M_{iz}$  les masses modales dans les trois directions pour chacun des modes. Si  $M$  est la masse totale de la structure, on a par définition

$$M = \sum_1^N M_{ix} = \sum_1^N M_{iy} = \sum_1^N M_{iz}$$

si  $N$  représente le nombre total de modes.

De plus on a

$$M_{ix} = \frac{U_{ix}^2}{Mg_i}$$

et de même avec  $y$  et  $z$  et avec

$Mg_i$  composante **MGEN** de l'objet SOLUTION ou indice **MASSE\_GENERALISEE** de la TABLE

$U_{xi}$  composante **QX** de l'objet SOLUTION ou indice **DEPLACEMENTS\_GENERALISES . 1** de la TABLE

$U_{yi}$  composante **QY** de l'objet SOLUTION ou indice **DEPLACEMENTS\_GENERALISES . 2** de la TABLE

$U_{zi}$  composante **QZ** de l'objet SOLUTION ou indice **DEPLACEMENTS\_GENERALISES . 3** de la TABLE

### 7.3 ANALYSE SPECTRALE

Pour le calcul des modes propres, on se reportera au Tome 1.

#### a) Influence des modes propres

On rappelle que l'influence des modes propres sur une réponse s'évalue grâce au concept de masse modale. On définit  $M_{ix}$ ,  $M_{iy}$ ,  $M_{iz}$  les masses modales dans les trois directions pour chacun des modes. Si  $M$  est la masse totale de la structure, on a par définition

$$M = \sum_1^N M_{ix} = \sum_1^N M_{iy} = \sum_1^N M_{iz}$$

si  $N$  représente le nombre total de modes.

De plus on a

$$M_{ix} = \frac{U_{ix}^2}{Mg_i}$$

et de même avec  $y$  et  $z$  et avec

$Mg_i$  composante **MGEN** de l'objet SOLUTION ou indice **MASSE\_GENERALISEE** de la TABLE

$U_{xi}$  composante **QX** de l'objet SOLUTION ou indice **DEPLACEMENTS\_GENERALISES . 1** de la TABLE

$U_{yi}$  composante **QY** de l'objet SOLUTION ou indice **DEPLACEMENTS\_GENERALISES . 2** de la TABLE

$U_{zi}$  composante **QZ** de l'objet SOLUTION ou indice **DEPLACEMENTS\_GENERALISES . 3** de la TABLE

## 8. CALCULS DYNAMIQUES NON LINEAIRES MECANIQUES

*lire d'abord le Tome 1*

Le schéma temporel est implicite.

### AMORTISSEMENT

Calcul de la matrice d'amortissement. Elle est de la forme  $\alpha K + \beta M$ .  $\alpha$  et  $\beta$  sont calculés par

$$\alpha = \frac{2(\xi_1\omega_1 - \xi_2\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

$$\beta = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_2\omega_1 - \xi_1\omega_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

- $\omega_1$  première pulsation propre de la structure non amortie
- $\omega_2$  deuxième pulsation propre de la structure non amortie
- $\xi_1$  facteur d'amortissement sur le premier mode
- $\xi_2$  facteur d'amortissement sur le deuxième mode
- $\alpha$  a la dimension d'un temps
- $\beta$  a la dimension d'une fréquence

$\alpha$  négligeable et  $\beta$  prépondérant permet de filtrer les basses fréquences,  $\beta$  négligeable et  $\alpha$  prépondérant permet de filtrer les hautes fréquences

On peut aussi choisir  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction du contenu fréquentiel d'une sollicitation. Par exemple, si l'on veut amortir les fréquences supérieures à  $f_c$ , on choisira

$$\alpha = \frac{\xi}{2\pi f_c}$$

$$\beta = 0$$

AM1 = ( $\alpha * K$ ) ET ( $\beta * M$ ) ;

K RIGIDITE créé par RIGI

M RIGIDITE créé par MASS

On peut aussi utiliser l'opérateur MASSe ou l'opérateur RIGIdité (avec un matériau adapté) pour calculer l'objet AM1.

*(voir MASSe, RIGIdité)*

### CHARGEMENT

Crée un objet de type CHARGEME selon deux possibilités :

CH1 = **CHAR** mot FT EV;

mot MOT de valeur **CONT, DIMP, MECA** ou **PSUI** ou **T**

FT CHPOINT de forces (voir le Tome 1). Dans le cas PSUI, il ne doit avoir qu'une composante, dans le cas CONT, c'est un MCHAML de type CONTRAIN

EV EVOLUTIO

CH1 = **CHAR** mot ttab ftab;

mot MOT de valeur **CONT, DIMP, MECA** ou **PSUI** ou **T**

ttab TABL de FLOTTANT indiquée par des ENTIER de 0 à n. On doit avoir

ttab . 0 = 0. ;  
ftab TABL de CHPOINT (ou de MCHAML dans le cas CONT) indiquée par les mêmes ENTIER de 0 à n et contenant les chargements aux instants figurant dans ttab.

Cette donnée est obligatoire même s'il n'y a qu'une vitesse initiale.

(voir *BSIGma*, *CNEQuivalent*, *DEPImposé*, *EVOLution ci dessous*, *FORCe*, *MOMEnt*, *PRESsion*)

### **DIMEnsion**

Permet d'obtenir la dimension d'une TABLE ou d'un LISTREEL. Utile pour post-traiter les calculs issus de PASAPAS.

NN = **DIME** TAB1.**TEMPS** ;

TAB1.TEMPS TABLE contenant les temps conservés par PASAPAS  
NN ENTIER

(voir *opérateurs de post-traitement*)

### **DREXUS**

Procédure de calculs dynamiques non linéaire par une méthode explicite (en bidimensionnel uniquement)

**DREXUS** TAB1 ;

TAB1 TABLE contenant les données et les résultats. Elle doit être déclarée comme telle avant utilisation

TAB1 = **TABL** ;

Données (les indices suivants sont à renseigner avant l'utilisation de PASAPAS)

TAB1. <b>CARACTERISTIQUES</b>	MCHAML
TAB1. <b>CHARGEMENT</b>	CHARGEME
TAB1. <b>COEFF_STABILITE</b>	FLOTTANT (par défaut 0.5)
TAB1. <b>FREQ_MENAGE</b>	ENTIER (50 par défaut)
TAB1. <b>FREQUENCE_SORTIE</b>	ENTIER (TEMPS_SORTIE ou FREQUENCE_SORTIE est obligatoire)
TAB1. <b>GRANDES_DEFORMATIONS</b>	<b>VRAI</b> ( <b>FAUX</b> par défaut)
TAB1. <b>IMPACT</b>	TABLE
TAB1. <b>IMPACT.ANGLE</b>	FLOTTANT
TAB1. <b>IMPACT.ESCLAVE</b>	MAILLAGE
TAB1. <b>IMPACT.LARGEUR</b>	FLOTTANT
TAB1. <b>IMPACT.MAITRE</b>	MAILLAGE
TAB1. <b>IMPACT.MASSE</b>	FLOTTANT
TAB1. <b>IMPACT.NEZ</b>	MAILLAGE ou POINT
TAB1. <b>IMPACT.VECTEUR</b>	POINT
TAB1. <b>LIAISONS</b>	RIGIDITE
TAB1. <b>MODELE</b>	MMODEL
TAB1. <b>NPASMAX</b>	ENTIER (10000000 par

<b>TAB1.PAS_TEMPS</b>	défait) FLOTTANT (si pas constant, par défaut pas automatique)
<b>TAB1.TEMPS_INITIAL</b>	FLOTTANT (0. par défaut)
<b>TAB1.TEMPS_SORTIE</b>	LISTREEL (TEMPS_SORTIE ou FREQUENCE_SORTIE est obligatoire)
<b>TAB1.VITESSE_INITIALE</b>	CHPOINT contenant les vitesses initiales.

Résultats (les indices suivants sont renseignés par PASAPAS)

<b>TAB1.ACCELERATIONS</b>	TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT contenant le champ de déplacements. Pour le nom des composantes, voir le chapitre Conditions aux Limites.
<b>TAB1.CONTRAINTEs</b>	TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant le champ de contraintes. Pour le nom des composantes, voir le volume Post-Traitement.
<b>TAB1.DEFORMATIONS_INELASTIQUES</b>	TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant le champ de déformations inélastiques. Le nom des composantes dépend du modèle utilisé (par exemple pour les modèles plastiques de type Von Mises, c'est EPSE -déformation plastique équivalente) (voir page 14).
<b>TAB1.DEPLACEMENTS</b>	TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT contenant le champ de déplacements. Pour le nom des composantes, voir le chapitre Conditions aux Limites.
<b>TAB1.FORCES_EXTERIEURES</b>	TABLE (indicée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT contenant le

TAB1.NPAS

TAB1.TEMPS

TAB1.VARIABLES\_INTERNES

TAB1.VITESSES

champ de réaction. Pour le nom des composantes, voir le chapitre Chargement.

TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de ENTIER

TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de FLOTTANT

TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant le champ de variables internes. Le nom des composantes dépend du modèle utilisé (par exemple pour les modèles plastiques de type Von Mises, c'est EPSE -déformation plastique équivalente) ((voir page 14).

TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT contenant les vitesses.

(voir TABLE dans le volume LANGAGE)

## EVOLution

Permet de définir une variation

EV = **EVOL** MANU nomabs lista nomord listo ;

EV EVOLUTIO

(voir CHARGement ci-dessus)

## FRONABS

Création de frontières absorbantes pour l'interaction sol-structure. Cette procédure ne s'utilise en l'état qu'en 2D avec des éléments à interpolation quadratique (**OPTI DIME 2 ELEM QUA8** ;).

TAB1 = **TABL** ;

AMABS = **FRONABS** TAB1 (mot) ;

TAB1 TABLE contenant les indices suivants

**FRONTIERE**

MAILLAGE (le maillage de SEG3 doit être parallèle aux axes)

**MASSE\_VOLUMIQUE**

FLOTTANT (masse volumique du sol)

**POISSON**

FLOTTANT (coefficient de Poisson du sol)

**YOUNG**

FLOTTANT (module d'Young du sol)

mot

MOT (type de la frontière) **LYSMER** (par défaut) ou **WHITE**

AMABS RIGIDITE (amortissement)

### **IMP**Frottement

Permet de créer un maillage d'élément de frottement pour remplir l'indice FROTTEMENT dans PASAPAS. Il ne fonctionne qu'après IMPOser. Le modèle associé doit être FROTTEMENT COULOMB.

MF = **IMP** MC ;  
MC MAILLAGE (créé par IMPOser)  
MF MAILLAGE

(voir IMPOser, MODEle, PASAPAS ci-dessous)

### **IMPO**ser

Permet de créer un maillage d'élément de contact pour remplir l'indice CONTACT dans PASAPAS. Il ne fonctionne qu'avec des éléments SEG2. Les lignes doivent se tourner le dos au sens de normales.

MC = **IMPO** MAIL L1 L2 ;  
L1 MAILLAGE (ligne)  
L2 MAILLAGE (ligne)  
MC MAILLAGE

(voir PASAPAS ci-dessous)

### **INDE**x

Crée une TABLE qui contient les indices d'une TABLE

TIND = **INDE** TAB1 ;  
TAB1 TABLE  
TIND TABLE

(voir TABLE dans le chapitre langage)

### **LUM**Per

Permet de diagonaliser la matrice de masse. Dans PASAPAS, il faut utiliser l'indice MASSE\_CONSTANTE sinon la matrice de masse est calculée dans PASAPAS (voir le Tome 1).

LAIM = **LUMP** maim ;  
maim RIGIDITE  
LAIM RIGIDITE de sous-type MASSE  
ou  
laim = **LUMP** MA MO ;  
MA MCHAML de matériau (composantes RHO et cara)  
MO MMODEL  
laim RIGIDITE de sous-type MASSE

(voir MASSE)

### **MAS**Se

Calcul des matrices de masse. La forme la plus simple est (si MA représente l'ensemble des matériaux - on a besoin de  $\rho$  et éventuellement des caractéristiques

géométriques - et MO l'ensemble des modèles).

maim = **MASS MA MO** ;

MA MCHAML de matériau (composantes RHO et cara)

MO MMODEL

maim RIGIDITE

Elle est calculée automatiquement dans PASAPAS sauf si elle est « lumpée »

(voir *LUMPer*)

## **MATERiau**

Données nécessaires pour quelques matériaux pour le non linéaire donnés dans l'ordre des modèles. (pour une information complète faire **INFO MATE** ;)

Voir 4.3 MATERIAU EN MECANIQUE NON LINEAIRE page 14.

(voir *MODEle ci-dessous*)

## **MODEle**

Quelques modèles pour le non linéaire (pour une information complète faire **INFO MODE** ;)

Voir 4.1 MODELE EN MECANIQUE NON LINEAIRE page 11.

(voir *MATERiau ci-dessus*)

## **PASAPAS**

Procédure de calculs dynamiques par une méthode implicite

**PASAPAS TAB1** ;

TAB1 TABLE contenant les données et les résultats. Elle doit être déclarée comme telle avant utilisation

TAB1 = **TABL** ;

De même que (éventuellement)

TAB1.**CONSTRAINTES** = **TABL** ;

TAB1.**DEPLACEMENTS** = **TABL** ;

TAB1.**VITESSES** = **TABL** ;

Données (les indices suivants sont à renseigner avant l'utilisation de

PASAPAS)

TAB1.**AMORTISSEMENT**

RIGIDITE

TAB1.**BLOCAGES\_MECANIKES**

RIGIDITE

TAB1.**CARACTERISTIQUES**

MCHAML

TAB1.**CHARGEMENT**

CHARGEME

TAB1.**CONTACT**

MAILLAGE

TAB1.**CONSTRAINTES . 0**

MCHAML. Les forces

équivalentes sont calculées  
sauf si elles existent dans

CHAR CONT.

TAB1.**DEPLACEMENTS . 0**

CHPOINT

TAB1.**DYNAMIQUE**

**VRAI**

TAB1.**FROTTEMENT**

MAILLAGE

TAB1.**GRANDS\_DEPLACEMENTS**

**VRAI**

(**FAUX** par défaut)



TAB1.GRANDES_DEFORMATIONS	<b>VRAI</b> ( <b>FAUX</b> par défaut)
TAB1.GRANDES_ROTATIONS	<b>VRAI</b> ( <b>FAUX</b> par défaut)
TAB1.MASSE_CONSTANTE	RIGIDITE
TAB1.MODELE	MMODEL
TAB1.TEMPS_CALCULES	LISTREEL
TAB1.AUTOMATIQUE	LOGIQUE ( <b>FAUX</b> par défaut ou <b>VRAI</b> ). Permet d'adapter le calcul du pas de temps tel que l'incrément de déformations totales n'excède pas la valeur fournie dans <b>AUTOCRIT</b> . Ne marche pas avec les matériaux dépendants de la température.
TAB1.AUTOCRIT	FLOTTANT (0.005 par défaut)
TAB1.AUTORESUS	ENTIER (1 par défaut). Dans le cas de pilotage automatique, indique le pas de sauvegarde
TAB1.TEMPS_SAUVES	LISTREEL
TAB1.FTOL	FLOTTANT
TAB1.VITESSES . 0	CHPOINT contenant les vitesses initiales.

Résultats (les indices suivants sont renseignés par PASAPAS)

TAB1.DEFORMATIONS_INELASTIQUES	TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant la partie non linéaire des déformations. Le nom des composantes dépend du type d'élément fini utilisé (voir le volume Post-Traitement).
TAB1.DEPLACEMENTS	TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT contenant le champ de déplacements. Pour le nom des composantes, voir le chapitre Conditions aux Limites.
TAB1.CONTRAINTE	TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant le

**TAB1.TEMPS**

**TAB1.REACTIONS**

**TAB1.VARIABLES\_INTERNES**

**TAB1.VITESSES**

champ de contraintes. Pour le nom des composantes, voir le volume Post-Traitement.

TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de FLOTTANT

TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT contenant le champ de réaction. Pour le nom des composantes, voir le chapitre Chargement.

TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de MCHAML contenant le champ de variables internes. Le nom des composantes dépend du modèle utilisé (par exemple pour les modèles plastiques de type Von Mises, c'est EPSE -déformation plastique équivalente) (voir page 14).

TABLE (indiquée par le numéro du pas sauvé) de CHPOINT contenant les vitesses.

Cas intéressant: le couplage thermique-mécanique en non linéaire

Les contraintes calculées dans PASAPAS sont les contraintes vraies (ie il ne faut pas soustraire les contraintes calculées par THETA), bien entendu si les contraintes sont prises dans la table (avec PECHE par exemple) et non calculées à partir des déplacements. De même dans le cas des contraintes initiales, il ne faut pas les ajouter.

*(voir TABLE dans le volume LANGAGE)*

## 9. EXEMPLES DYNAMIQUES NON LINEAIRES MECANIQUES

### 9.1 POUR FAIRE UNE REPRISE AVEC PASAPAS

Soit TAB1 la TABLE qui est passée dans **PASAPAS**.

PREMIERE METHODE

Sans sortir de CASTEM2000®

DEUXIEME METHODE

Après sortie de CASTEM2000® où l'on a fait une étape de sauvetage des résultats:

**SAUV** TAB1 ;

On fait donc une reprise:

**REPR** ;

Puis, dans les deux cas, il suffit de choisir l'instant de reprise (par défaut, c'est le dernier sauvé) et d'étendre certaines valeurs de la table .

TAB1 . **REPRISE** = ;

TAB1 . **TEMPS\_CALCULES** = **PROG** tini **PAS** Δt tfin ;

TAB1 . **TEMPS\_SAUVES** = **PROG** tempssauvés ;

Et de relancer

**PASAPAS** TAB1 ;

## 10. TYPE D'OBJETS CREES

Ils sont définis par des mots de huit lettres au maximum. Le type d'un objet peut être retrouvé par l'opérateur **TYPE**.

motype = **TYPE** objet ;

### **AMORMODA**

Créé par:

Utilisé par:

### **BASEMODA**

Créé par:

Utilisé par:

### **CHARGEME**

Créé par: **CHAR**

Utilisé par: **PASAPAS**

### **CHPOINT** (voir Note sur la nature des CHPOINT dans le Tome 1)

Créé par: **BSIG, CHAN, CNEQ, DEBI, DEPI, FORC, FORBLOC, FOR\_CONT, FREPART, IMPO BLOC, JEU, MANU, MOME, PRES, RESO**

Utilisé par: **CHAR, CNEQ, FORBLOC, FOR\_CONT, PASAPAS, PRES, RESO**

### **ENTIER** (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par:

Utilisé par:

### **EVOLUTIO**

Créé par: **EVOL,**

Utilisé par: **CHAR, NUAG**

### **FLOTTANT** (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par:

Utilisé par: **NUAG**

### **LISTENTI** (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par: **LECT**

Utilisé par:

### **LISTMOTS**

Créé par: **MOTS**

Utilisé par:

### **LISTREEL** (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par: **PROG**

Utilisé par: **EVOL, PASAPAS**

### **LOGIQUE** (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par:

Utilisé par: **PASAPAS**

### **MAILLAGE** (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par: **IMPF, IMPO MAIL**

Utilisé par: **ANTI, APPU, BLOQ, COLLER, COLLER1, DEBI, FORC, FORBLOC, FOR\_CONT, FREPART, IMPF, IMPO BLOC, MANU, MODE, MOME, PASAPAS, PRES, RELA, RIGI, SYME**

**MCHAML**

Créé par: **CHAN, HOOK, MANU, MATE, THET**

Utilisé par: **HOOK, KSIG, MASS, PASAPAS, PERM, RIGI, THET**

**MMODEL**

Créé par: **MODE**

Utilisé par: **BSIG, MASS, MATE, PASAPAS, PERM, RIGI, KP, KSIG, THET, MOT**

**MOT**

Créé par: **MOT, TYPE**

Utilisé par: **BLOQ, MATE, MODE, OPTI, PASAPAS, RELA, VIBR**

**NUAGE**

Créé par: **NUAG**

Utilisé par: **MATE**

**PERMEABI**

Créé par: **PERM**

Utilisé par: **RESO**

**POINT** (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par:

Utilisé par: **ANTI, APPU, BLOQ, DEBI, FORC, FREPART, IMPO BLOC, JEU, MANU, MODE, MOME, PASAPAS, RELA, RIGI, SYME**

**RIGIDITE**

Créé par: **ANTI, APPU, BLOQ, COLLER, COLLER1, IMPO BLOC, MANU, MASS, RELA, RIGI, SYME**

Utilisé par: **JEU, LUMP, PASAPAS, PERM, RESO, VIBC, VIBR**

**SOLUTION**

Créé par: **VIBR**

Utilisé par:

**STRUCTUR**

Créé par:

Utilisé par: **TRAD**

**TABLE** (voir volume Maillage et Présentation du Langage)

Créé par: **TABL, TRAD, VIBC, VIBR**

Utilisé par: **CHAR, FRONABS, PASAPAS, VIBC**

**TEXTE**

Créé par:

Utilisé par:

## 11. ESSAI DE RECENSEMENT DES VALEURS PAR DEFAUT

Pour chacun des opérateurs, on fournit, quand elles existent, les valeurs par défaut choisies par CASTEM2000®.

DEPImposé

DREXUS

Coefficient de stabilité = 0.5

Déplacements initiaux nuls

Fréquence de ménage = 50

Nombre de pas de temps = 10 000 000 (*Attention*)

Pas de temps automatique

Petites déformations

Temps initial nul

Vitesses initiales nulles

MANUel

MATERiau

MODEle

Un matériau ELASTIQUE est ISOTROPE

Un matériau DARCY est ISOTROPE

Un matériau PLASTIQUE a un écrouissage ISOTROPE

Un matériau FROTTEMENT est COULOMB

Un modèle a un CONSTITUANT

Le nom de l'élément fini est celui de l'élément géométrique

OPTIon

PASAPAS

Les valeurs initiales (déplacements, vitesses, contraintes) sont nulles.

RESOLution

## 12. REFERENCES GENERALES

Foundations of Solid Mechanics	<b>Y.C. Fung</b> <i>Prentice-Hall</i>	1965
Theory of Matrix Structural Analysis	<b>J. Przemieniecki</b> <i>McGraw-Hill</i>	1968
Finite Elements of Nonlinear Continua	<b>J.T. Oden</b> <i>McGraw-Hill</i>	1972
Dynamics of Structures	<b>R.W. Clough - J. Penzien</b> <i>McGraw-Hill</i>	1975
Une Présentation de la Méthode des Eléments Finis	<b>G. Dhatt - G. Touzot</b> <i>Maloine</i>	1981
Analyse de Structures par Eléments Finis (1 <sup>e</sup> édition)	<b>J.F. Imbert</b> <i>Cépadues</i>	1984
Numerical Methods for Non Linear Problems	<b>C.A. Felippa</b> <i>Pineridge Press</i>	1984
Finite Elements and Solution Procedures for Structural Analysis	<b>M.A. Crisfield</b> <i>Pineridge Press</i>	1986
Die Methode der Finiten Elemente (3 tomes)	<b>J.H. Argyris - H.P. Mlejnek</b> <i>Vieweg</i>	1986-87-88
Finite Element Method	<b>T.J.R. Hughes</b> <i>Prentice Hall</i>	1987
Mécanique des Matériaux Solides	<b>J. Lemaitre - J.L. Chaboche</b> <i>Dunod</i>	1988
Concepts and Applications of Finite Element Analysis	<b>R.D. Cook - D.S. Malkus &amp; al</b> <i>J. Wiley &amp; Sons</i>	1989
The Finite Element Method (2 tomes)	<b>R.L. Taylor - O.C. Zienkiewicz</b> <i>McGraw-Hill</i>	1989-91
La Méthode des Eléments Finis	<b>J.H. Saiaç &amp; al (trad)</b> <i>AFNOR</i>	1991 (vol.1)
Modélisation des Structures par Eléments Finis (3 tomes)	<b>J.L. Batoz - G. Dhatt</b> <i>Hermès</i>	1990-92
Finite Element Analysis	<b>B. Szabo - I. Babuska</b> <i>J. Wiley &amp; Sons</i>	1991

Comportement Mécanique des Matériaux (2 tomes)	<i>Hermès</i>	<b>D. François - A. Pineau &amp; al</b> 1991-93
Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures (2 tomes)	<i>J. Wiley &amp; Sons</i>	<b>M.A. Crisfield</b> 1991-97
Mécanique des Structures par Eléments Finis	<i>Masson</i>	<b>P. Trompette</b> 1992
Méthodes Numériques en Mécanique des Solides	<i>P.P.U.R.</i>	<b>A. Curnier</b> 1993
Finite Elements : Their Design and Performance	<i>Marcel Dekker Inc.</i>	<b>R.H. Mc Neal</b> 1994
Finite Element Modeling for Stress Analysis	<i>J. Wiley &amp; Sons</i>	<b>R.D. Cook</b> 1995
Finite Element Procedures	<i>Prentice Hall</i>	<b>K.J. Bathe</b> 1995



## **13. ANNEXE THEORIQUE**

### ***13.1 ALGORITHME DE FU-DEVOGELAERE***

### 13.2 ALGORITHME IMPLICITE DE NEWMARK

Le schéma général de l'algorithme utilisé dans PASAPAS s'écrit sous la forme suivante pour un pas de temps  $\Delta t$  donné :

$$\begin{cases} Ku_{n+1} + Cv_{n+1} + Ma_{n+1} = F_{n+1} \\ u_{n+1} = u_n + v_n \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) a_n \Delta t^2 + \beta a_{n+1} \Delta t^2 \\ v_{n+1} = v_n + (1 - \gamma) a_n \Delta t + \gamma a_{n+1} \Delta t \end{cases}$$

avec  $u_0$  et  $v_0$  connus et  $u_{n+1}$  (resp  $v_{n+1}$ ,  $a_{n+1}$ ,  $F_{n+1}$ ) une estimation de  $U(t+\Delta t)$  (resp  $V(t+\Delta t)$ ,  $A(t+\Delta t)$ ,  $F(t+\Delta t)$ ).

On montre que ce schéma est inconditionnellement stable si  $2\beta \geq \gamma \geq 0.5$ . Le paramètre  $\beta$  contrôle la stabilité et le paramètre  $\gamma$  la dissipation de l'algorithme.

Dans CASTEM2000<sup>®</sup>, on a pris  $\beta=0.25$  et  $\gamma = 0.5$  ce qui donne  $u_{n+1}$  par la formule :

$$\left( K + \frac{4M}{\Delta t^2} + \frac{2C}{\Delta t} \right) u_{n+1} = F_{n+1} + u_n \left( \frac{4M}{\Delta t^2} + \frac{2C}{\Delta t} \right) + v_n \left( \frac{4M}{\Delta t} + C \right) + Ma_n$$

et donc  $v_{n+1}$  et  $a_{n+1}$ .

*Cette hypothèse (en particulier sur  $\gamma$ ) signifie que l'accélération est constante à l'intérieur du pas de temps  $\Delta t$ . Il est possible de choisir un autre jeu de paramètre, en particulier  $\beta = 1/6$  et  $\gamma = 1/2$  correspond à une accélération linéaire à l'intérieur du pas de temps  $\Delta t$ .*

Sur cette formule on voit que l'algorithme est implicite, car il nécessite l'inversion du premier membre (une fois pour toutes si  $\Delta t$  est constant) pour calculer  $u_{n+1}$ . Le choix du pas de temps  $\Delta t$  est fait par l'utilisateur (indice TEMPS\_CALCULES) et va influencer sur la précision du résultat. Il va dépendre de la structure, en particulier des périodes propres, des non-linéarités éventuelles et du contenu fréquentiel de la sollicitation  $F(t)$ . On peut dire d'une manière très générale, « une fraction d'une période propre »!!

### **13.3 RECOMBINAISON QUADRATIQUE COMPLETE (CQC)**

## **13.4 RECOMBINAISON QUADRATIQUE SIMPLE (SRSS)**

### **13.5 RECOMBINAISON QUADRATIQUE DIX POUR CENT**

### 13.6 ALGORITHME EXPLICITE

Le schéma général de l'algorithme utilisé dans DREXUS s'écrit sous la forme suivante pour un pas de temps  $n$  donné

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t V_n + \Delta t^2 A_n / 2$$

$$\varepsilon_{n+1} =$$

$$\sigma_{n+1} =$$

$$F_{n+1} =$$

$$A_{n+1} = M^{-1} \cdot F_{n+1}$$

$$V_{n+1} = V_n + \Delta t \cdot (A_n + A_{n+1}) / 2$$

avec  $U_0$ ,  $V_0$  et  $A_0$  connus et  $U_{n+1}$  (resp  $V_{n+1}$ ,  $A_{n+1}$ ,  $F_{n+1}$ ) une estimation de  $U(t+\Delta t)$  (resp  $V(t+\Delta t)$ ,  $A(t+\Delta t)$ ,  $F(t+\Delta t)$ ).

On montre que ce schéma est conditionnellement stable.

## 14. REPERES BIOGRAPHIQUES

**BIOT M.A.**

**COULOMB** Charles

*critère de frottement*

**CROUT**

*algorithme de renumérotation*

**DARCY**

*gradient hydraulique*

**DRUCKER**

*critère de plasticité*

**FOURIER** Joseph                      Auxerre 21-03-1768; Paris 16-05-1830

*équation de la chaleur, transformée*

**HERTZ** Heinrich

*unité S.I. de fréquence depuis*

**HOOKE** Robert

*loi de comportement*

**KELVIN** (lord) William THOMSON                      Belfast 26-06-1824; Glasgow 17-12-1912

*unité S.I. de température depuis*

**KIRCHHOFF** Gustav Peter

*hypothèse de coques minces*

**LAGRANGE** Joseph Louis    Turin 25-01-1736; Paris 10-04-1813

**LAME** Gustave

*coefficient d'élasticité*

**LANCZOS**

*algorithme de calcul de valeurs propres*

**LOVE** A.E.H.

**LYSMER** John

*frontière absorbante*

**MINDLIN**

*hypothèse de coques épaisses*

**NEWMARK**

*algorithme de résolution d'une équation différentielle de deuxième ordre*

**NEWTON** Isaac                      Grantham 04-01-1643; Kensington 31-03-1727

*unité S.I. de force depuis*

**NORTON**

*loi de fluage*

**PASCAL** Blaise                      Clermont-Ferrand 19-06-1623; Paris 19-08-1662

*unité S.I. de pression depuis*

**POISSON** Denis

*coefficient d'élasticité*

**PRAGER**

**PRANDTL**

*critère d'écoulement plastique*

**REISSNER**

**REUSS**

*critère d'écoulement plastique*

**ROSENBLUETH**

**STURM**

**TERZAGHI**

*loi de la consolidation*

**TIMOSHENKO** Stephen

**VON MISES** Richard Edler

*critère de plasticité*

**WATT** James                      Greenock (Ecosse) 19-01-1736; Handsworth 19-08-1819

*unité S.I. de puissance depuis*

**WHITE**

**YOUNG** Thomas

*coefficient d'élasticité*



## 15. INDEX

-,6

\*

\*,50, 67

### A

**AMOR**,50, 55, 67

**AMORTISSEMENT** voir DYNE, PASAPAS, SISSIB

### B

**BASE**,58

**BLOQ**,30

**BLOQ**

DEPL,30, 32

**BSIG**,35, 36, 39, 42

### C

**CAPA**,34, 41

**CHAN**,40

**CHAR**,25, 50, 55, 67

**CHAR**

CONT,25, 50, 51, 67

DIMP,25, 35, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 45, 50, 51, 67

MECA,25, 35, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 45, 47, 50, 51, 67

PSUI,25, 50, 51, 67

Q,34, 41

T,25, 34, 36, 39, 41, 43, 50, 51, 67

TE,34, 41

TIMP,34, 41

**CONT** voir CHAR voir CHAR voir CHAR

### D

**DALL**

PLAN,47

**DEPI**,6, 78

**DEPLACEMENTS\_GENERALISES**,65, 66

**DIME**,26, 51, 68

**DIMP** voir CHAR voir CHAR voir CHAR

**DREXUS**,68, 86

**DREXUS**

ACCELERATIONS,69

CARACTERISTIQUES,68

CHARGEMENT,68

COEFF\_STABILITE,68

CONTRAINTES,69

DEFORMATIONS\_INELASTIQUES,69

DEPLACEMENTS,69

FORCES\_EXTERIEURES,69

FREQ\_MENAGE,68

FREQUENCE\_SORTIE,68

GRANDES\_DEFORMATIONS,68

IMPACT,68

IMPACT ANGLE,68

IMPACT ESCLAVE,68

IMPACT LARGEUR,68

IMPACT MAITRE,68

IMPACT MASSE,68

IMPACT NEZ,68

IMPACT VECTEUR,68

LIAISONS,68

MODELE,68

NPAS,70

NPASMAX,68

PAS\_TEMPS,69

TEMPS,70

TEMPS\_INITIAL,69

TEMPS\_SORTIE,69

VARIABLES\_INTERNES,70

VITESSE\_INITIALE,69

VITESSES,70

**DYNAMODE**,55

**DYNE**

AMORTISSEMENT,56

BASE\_A,56

DE\_VOGELAERE,55

DEPLACEMENT,55

VITESSE,55

### E

**ELIM**,30, 32

**ET**,36

**EVOL**,25, 36, 56

**EVOL**

MANU,36, 37, 38, 40, 45, 47, 51, 56, 70

RECO,56

SOLU,56

T,36, 39

TINF,36, 39

TSUP,39

**EXTR**

MATE,14

VARI,14

### F

**FLUX** voir CHAR voir CHAR voir CHAR

**FORC**,6

**FRONABS**,51, 70

### I

**IMPF**,13, 30, 32, 71

**IMPO**,13

**IMPO**

MAIL,13, 30, 32, 52, 71

**INDE**,26, 52, 71

**INFO**,5

MATE,14

**INFO**

MATE,72

MODE,11, 72

### L

**LIAI**,45

**LUMP**,34, 41, 52, 71

## M

**M\_DAMP\_K**,52

**M\_DAMPIN**,52

**MAIL** voir IMPO

**MANU**,78

**MASS**,50, 52, 67, 71

**MASSE\_GENERALISEE**,65, 66

**MATE**,14, 36, 39, 72, 78

**MATE**

AF1,43

AF2,43

AF3,43

ALFA,12

ALPH,34, 36, 39, 41

C,34, 40

COB,47

COHE,45

K,34, 40

KN,45

KS,45

MOB,47

MU,30, 32

NU,34, 36, 37, 39, 41, 43, 45, 47

PERM,47

RHO,34, 40

SIGY,39

SMAX,43

TRAC,37, 39, 41, 45

VISC,47

YOUN,34, 36, 37, 39, 41, 43, 45, 47

**MECA** voir CHAR voir CHAR voir CHAR

**MGEN**,65, 66

**MODE**,6, 11, 34, 72, 78

**MODE**

ANISOTROPE,11

CONVECTION,35, 42

FROTTEMENT COULOMB,11, 13, 30, 32

INTEGRE,12

LIQUIDE,11

LIQUIDE MECANIQUE,11

MECANIQUE,35, 42

MECANIQUE ELASTIQUE,34, 44

MECANIQUE ELASTIQUE ENDOMMAGEMENT

UNILATERAL,11

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE

BLACKBURN,11

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE

BLACKBURN\_2,11

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE

CERAMIQUE,11

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE

LEMAITRE,11

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE NORTON,11,  
43

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE

POLYNOMIAL,11

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE

RCCMR\_304,11

MECANIQUE ELASTIQUE FLUAGE

RCCMR\_316,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE,11, 37,  
38, 40, 45

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
AMADEI,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
BETOCYCL,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
BETON,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
BETON\_INSA,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
BETON\_UNI,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
CAM\_CLAY,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
CHABOCHE1,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
CHABOCHE2,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
CINEMATIQUE,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
COULOMB,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
DRUCKER\_PARFAIT,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
DRUCKER\_PRAGER,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
ENDOMMAGEABLE,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE JOINT,45

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
JOINT\_DILATANT,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
OTTOSEN,11

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
PARFAIT,11, 38

MECANIQUE ELASTIQUE PLASTIQUE  
UBIQUITOUS,11

MECANIQUE ELASTIQUE VISCOPLASTIQUE  
DDI,11

MECANIQUE ELASTIQUE VISCOPLASTIQUE  
GUIONNET,11

MECANIQUE ELASTIQUE VISCOPLASTIQUE  
PARFAIT,11

ORTHOTROPE,11

POREUX,12, 47

POREUX PLASTIQUE CINEMATIQUE,12, 49

POREUX PLASTIQUE DRUCKER\_PARFAIT,12,  
49

POREUX PLASTIQUE DRUCKER\_PRAGER,12,  
49

POREUX PLASTIQUE ISOTROPE,12, 49

POREUX PLASTIQUE PARFAIT,12, 49

THERMIQUE,35, 41

THERMIQUE ISOTROPE,34, 40

**MOT**,6

## N

**NUAG**,38

**NUAG**

COMP,38, 41

## O

**OPTI**,6, 78

**OPTI**

DIME,47, 70

ELEM,47, 70  
PLAN DEFO,47

## P

**PASAPAS**,5, 6, 26, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 53, 54, 64, 72, 74, 75, 78, 82  
**PASAPAS**  
AMORTISSEMENT,53, 72  
AUTOCRIT,27, 73  
AUTOMATIQUE,26, 73  
AUTORESUS,27, 73  
BLOCAGES\_MECAIQUES,26, 31, 33, 35, 37, 41, 43, 44, 45, 48, 53, 72  
BLOCAGES\_THERMIQUES,35, 41  
CARACTERISTIQUES,26, 31, 33, 35, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 45, 47, 53, 72  
CHARGEMENT,26, 35, 36, 37, 39, 41, 43, 44, 45, 48, 53, 72  
CONSOLIDATION,48  
CONTACT,26, 31, 32, 53, 72  
CONTRAINTES,26, 43, 53, 72  
DEFORMATIONS\_INELASTIQUES,27, 73  
DEPLACEMENTS,26, 43, 53, 72  
DUPONT,35, 42  
DYNAMIQUE,53, 72  
FROTTEMENT,26, 31, 32, 72  
FTOL,27, 73  
GRANDES\_DEFORMATIONS,26, 73  
GRANDES\_ROTATIONS,26, 44, 73  
GRANDS\_DEPLACEMENTS,26, 31, 33, 44, 72  
LINEAIRE,35, 42  
MASSE\_CONSTANTE,34, 35, 41, 42, 53, 73  
MODELE,26, 31, 35, 37, 41, 43, 44, 46, 47, 53, 73  
NONLINEAIRE,35, 42  
PAS\_MAX,35, 42  
PERMEABILITE,48  
PHASE,35, 42  
PROCEDURE\_THERMIQUE,35, 42  
PROJECTION,42  
RAYONNEMENT,35, 42  
REACTIONS,27, 53, 74  
REPRISE,29, 64, 75  
TALPHA\_REFERANCE,35, 36, 42  
TEMPERATURES,35, 42  
TEMPS,27, 74  
TEMPS\_CALCULES,26, 29, 35, 42, 48, 53, 64, 73, 75  
TEMPS\_SAUVES,27, 29, 53, 64, 73, 75  
VARIABLES\_INTERNES,28, 74  
VITESSES,53, 72  
**PATIN**,13, 52  
**PECHE**,28, 35, 36, 39, 42, 54, 74  
**PERM**,47  
**PJBA**,56  
**PRES**  
MASS,47  
**PROG**,29, 36, 37, 38, 40, 45, 64, 75  
**PSMO**,56  
**PSUI** voir CHAR voir CHAR voir CHAR

## Q

**Q** voir CHAR voir CHAR voir CHAR  
**QX**,65, 66  
**QY**,65, 66  
**QZ**,65, 66

## R

**RACC**,45  
**RECO**,56  
**REPR**,29, 64, 75  
**RESO**,5, 57, 78  
**RIGI**,50, 67

## S

**SAUV**,29, 64, 75  
**SIGM**,6  
**SISSI**,58  
**SISSI**  
ACCE,61  
AMORT,58  
BASE,59  
COMBI,59  
CONT,61  
DEPL,61  
EXCIT,59  
IMPRE,60  
REAC,62  
SORTIE,60  
SUPPORT,61  
TRONC,61  
**SISSI2**,58  
**SISSIB**,62  
**SISSIB**  
AMORTISSEMENT,62  
EXCITATION,62  
STRUCTURE,62  
**STRU**,63

## T

**T** voir CHAR, EVOL voir CHAR, EVOL voir CHAR, EVOL  
**TABL**,47  
**TAIL**,19  
**TE** voir CHAR voir CHAR voir CHAR  
**TEMPERATURES**,36, 39  
**TEMPS**,26, 36, 39, 51, 68  
**THET**,6, 28, 54, 74  
**TIMP** voir CHAR voir CHAR voir CHAR  
**TRAD**,55, 57  
**TYPE**,76

## V

**VIBR**  
TBAS,55  
**VSUR**,13, 52