

## Introduire un nouveau comportement

---

### Résumé :

Comment introduire un nouveau comportement ?

On décrit ici l'ajout d'un nouveau comportement pour résoudre un problème non linéaire posé sur une structure, avec `STAT_NON_LINE` ou `DYNA_NON_LINE`, pour tous les éléments 2D / 3D (et coques, tuyaux, poutres multi-fibres, ...)

### Étapes essentielles :

- Écriture de la documentation de référence R (équations de la loi de comportement)
- Modification du catalogue de `DEFI_MATERIAU` (paramètres matériau de la loi de comportement)
- Ajout du catalogue python de la relation de comportement
- Choix de la méthode d'intégration parmi les possibilités suivantes :
  - écriture d'une routine autonome `lc0nn` intégrant le comportement en un point d'intégration
  - intégration explicite (`ALGO_INTE='RUNGE_KUTTA'`) et écriture des routines associées
  - intégration implicite dans l'environnement `PLASTI`, implantation « complète » (`ALGO_INTE='NEWTON'`)
  - intégration implicite dans l'environnement `PLASTI`, implantation « facile » (`ALGO_INTE='NEWTON_PERT'`)
- Produire des tests !

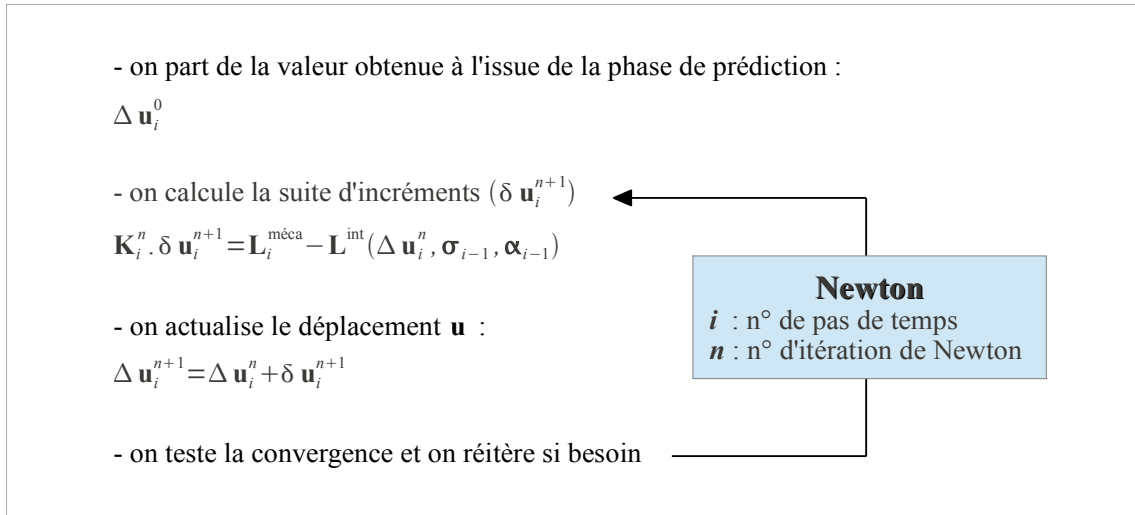
**Remarque** : il est également possible de programmer des lois de comportement soit dans une routine de type `Umat` (cf. [U2.10.01]), soit à l'aide de `MFront` (cf. [U2.10.02] et le paragraphe 5 de ce document).

## Table des Matières

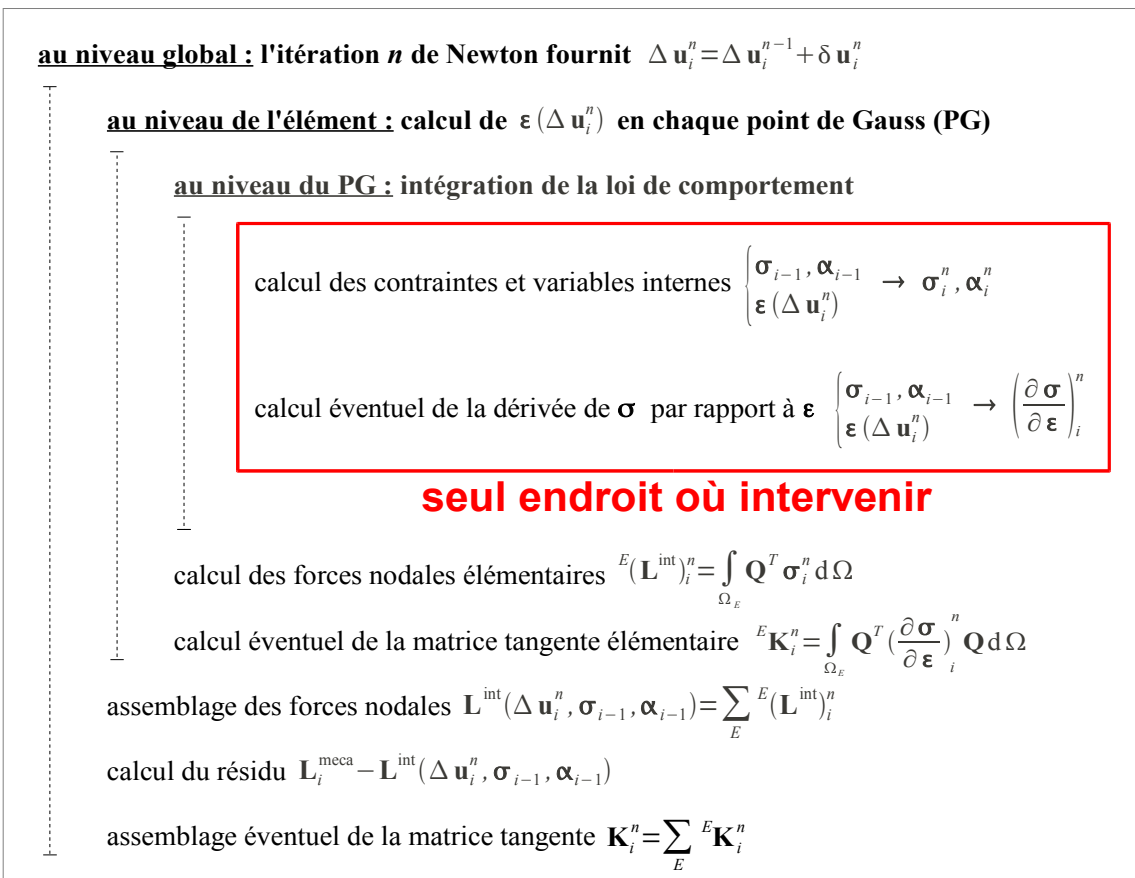
1 Schéma général de résolution dans STAT_NON_LINE.....	3
1.1 Options de calcul concernées.....	4
1.1.1 Option FULL_MECA (Full Newton).....	4
1.1.2 Option RAPH_MECA (Newton-Raphson).....	4
1.1.3 Option RIGI_MECA_TANG (calcul de la matrice tangente en prédiction).....	4
1.2 Remarques concernant le calcul du résidu et de la matrice tangente.....	5
1.2.1 Calcul du résidu.....	5
1.2.2 Calcul de la matrice tangente.....	5
2 Documentation de Référence et choix de la méthode d'intégration.....	6
3 Mode opératoire : les catalogues.....	7
3.1 Modification du catalogue de DEFI_MATERIAU.....	7
3.2 Modification du catalogue C_RELATION.....	7
3.3 Ajouter le catalogue de la loi de comportement.....	7
4 Mode opératoire : les routines à écrire.....	8
4.1 Première possibilité : introduire un nouveau comportement explicite – schéma de RUNGE - KUTTA.....	9
4.2 Deuxième possibilité : introduction « complète » d'un nouveau comportement dans PLASTI (implicite).....	10
4.3 Troisième possibilité : utilisation des routines de l'intégration explicite dans une intégration implicite avec PLASTI.....	13
4.3.1 Principe.....	13
4.3.2 Exemple.....	14
4.4 Quatrième possibilité : écrire une routine lc00nn autonome.....	15
4.4.1 lc00nn : routine relative à un point d'intégration d'un élément, spécifique à une loi de comportement.....	15
4.4.2 Organisation de la routine à écrire.....	16
5 Cas particulier des lois MFront.....	19
5.1 Catalogue pour DEFI_MATERIAU et RELATION.....	19
5.2 Catalogue du comportement.....	19
6 Validation et maintenance.....	19

## 1 Schéma général de résolution dans STAT\_NON\_LINE

Itération de Newton sur le système complet



Référence : Principe de résolution (algorithme de Newton) [R5.03.01] et module de cours Aster Non linéaire



## 1.1 Options de calcul concernées

### 1.1.1 Option FULL\_MECA (Full Newton)

Au pas de temps  $i$  et à l'itération de Newton  $n$ , à partir des contraintes et variables internes à l'équilibre précédent  $(\sigma_{i-1}, \alpha_{i-1})$  et de l'incrément de déformation  $\varepsilon(\Delta \mathbf{u}_i^n)$  (et éventuellement avec les paramètres : température, hydratation, ...), calcul en chaque point de Gauss de chaque élément fini :

- des contraintes et variables internes (SIEF\_ELGA, VARI\_ELGA) :

$$\begin{cases} \sigma_{i-1}, \alpha_{i-1} \\ \varepsilon(\Delta \mathbf{u}_i^n) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \sigma_i^n, \alpha_i^n \end{cases}$$

- de l'opérateur tangent :

$$\begin{cases} \sigma_{i-1}, \alpha_{i-1} \\ \varepsilon(\Delta \mathbf{u}_i^n) \end{cases} \rightarrow \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_i^n$$

Cette option est calculée si REAC\_ITER= $m$  dans le fichier de commandes, et que le numéro d'itération  $n$  est multiple de  $m$  (réactualisation de la matrice tangente cohérente).

### 1.1.2 Option RAPH\_MECA (Newton-Raphson)

Au pas de temps  $i$  et à l'itération de Newton  $n$ , à partir des contraintes et variables internes à l'équilibre précédent  $(\sigma_{i-1}, \alpha_{i-1})$  et de l'incrément de déformation  $\varepsilon(\Delta \mathbf{u}_i^n)$  (et éventuellement avec les paramètres : température, hydratation, ...), calcul en chaque point de Gauss de chaque élément fini :

- des contraintes et variables internes (SIEF\_ELGA, VARI\_ELGA) :

$$\begin{cases} \sigma_{i-1}, \alpha_{i-1} \\ \varepsilon(\Delta \mathbf{u}_i^n) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \sigma_i^n, \alpha_i^n \end{cases}$$

Cette option est calculée si REAC\_ITER=0 ou REAC\_ITER= $m$  dans le fichier de commandes, et que le numéro d'itération  $n$  n'est pas multiple de  $m$ .

### 1.1.3 Option RIGI\_MECA\_TANG (calcul de la matrice tangente en prédiction)

A l'itération 0 du pas de temps  $i$  (initialisation de l'algorithme de Newton), on choisit comme matrice tangente de prédiction la matrice tangente à l'équilibre précédent ( $i-1$ ), soit  $\mathbf{K}_i^0 = \mathbf{K}_{i-1}$ . À partir des contraintes et variables internes à l'équilibre précédent  $(\sigma_{i-1}, \alpha_{i-1})$ , calcul en chaque points de Gauss de chaque élément fini :

- de l'opérateur tangent en prédiction :

$$\sigma_{i-1}, \alpha_{i-1} \rightarrow \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_i^0$$

Cette option est calculée si `REAC_INCR=m` dans le fichier de commandes, et que le numéro de pas de temps  $i$  est multiple de  $m$  (réactualisation de l'opérateur tangent en prédiction).

## 1.2 Remarques concernant le calcul du résidu et de la matrice tangente

### 1.2.1 Calcul du résidu

Le calcul exact du résidu  $\mathbf{L}_i^{\text{meca}} - \mathbf{L}^{\text{int}}(\Delta \mathbf{u}_i^n, \boldsymbol{\sigma}_{i-1}, \boldsymbol{\alpha}_{i-1})$  (et donc des contraintes et des variables internes) est fondamental : il garantit que l'on convergera vers la solution du problème. Une petite erreur dans l'évaluation du résidu peut avoir des conséquences graves.

### 1.2.2 Calcul de la matrice tangente

#### Matrice tangente dite cohérente ou consistante (Option `FULL_MECA`) :

Réactualisée à chaque itération, elle assure la meilleure vitesse de convergence (quadratique) à l'algorithme de Newton (figure 1.2.2-1). Son calcul reste cependant coûteux, et dans le cas où l'on utilise un solveur direct, il faut ajouter au coût de chaque réactualisation celui d'une factorisation. Enfin, pour de grands incréments de chargement, la matrice tangente cohérente peut conduire à des divergences de l'algorithme.

#### Autres matrices « tangentes » :

On peut faire des erreurs ou des approximations dans le calcul de la matrice "tangente" : ceci conduit à dégrader la vitesse de convergence par rapport à celle qui est obtenue avec la matrice tangente cohérente réactualisée à chaque itération, mais la solution obtenue reste juste tant que le résidu est calculé de manière exacte. Il existe plusieurs variantes (méthodes de quasi-Newton) possibles autorisées par `STAT_NON_LINE` (pour plus de détails voir [R5.03.01]) :

- Matrice élastique (figure 1.2.2-2 )
  - calculée une seule fois (économique) à partir des paramètres d'élasticité
  - recommandée en cas de décharge
  - convergence lente mais assurée
  
- Matrice tangente réactualisée tous les  $i_0$  incréments de charge (figure 1.2.2-3 ) ou toutes les  $n_0$  itérations de Newton (figure 1.2.2-4 )
  - coût moindre
  - direction moins bien évaluée
  - diverge parfois dans les zones de forte non linéarité

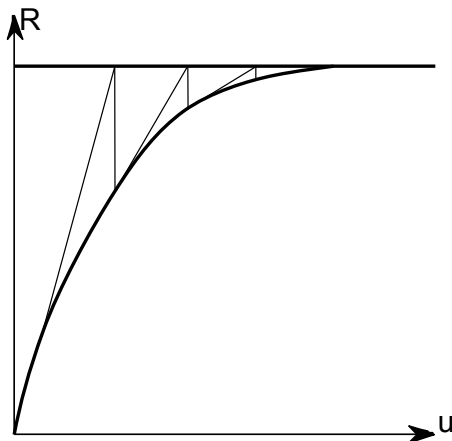


Figure 1.2.2-1: matrice tangente réactualisée à chaque itération

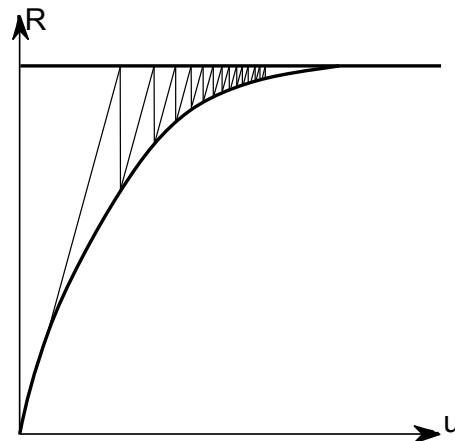


Figure 1.2.2-2: matrice élastique

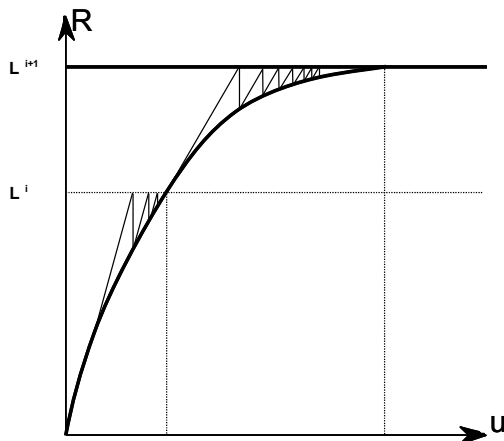


Figure 1.2.2-3: matrice tangente réactualisée à chaque incrément de chargement

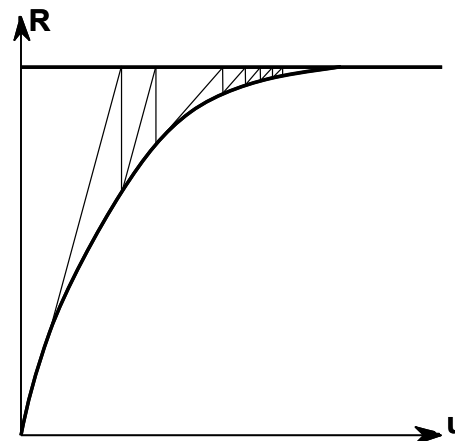


Figure 1.2.2-4: matrice tangente réactualisée toute les deux itérations de Newton

## 2 Documentation de Référence et choix de la méthode d'intégration

L'écriture de la Documentation de Référence est préalable à la phase de développement. Le document ( cf. par exemple [R5.03.02]) doit spécifier selon le type de modélisation concernée (milieux continus 2D D\_PLAN / AXIS et 3D , ou modèles à plasticité locale tels que les coques, les plaques et les tuyaux et C\_PLAN ... ) :

- le choix de la méthode d'intégration (voir les différentes possibilités détaillées au § 4) ;
- les équations permettant de calculer les contraintes et variables internes ;
- les équations permettant de calculer les deux matrices tangentes (options RIGI\_MECA\_TANG et FULL\_MECA).

On peut citer d'autres exemples de Documentations de Référence :

- [R5.03.04] : Relations de comportement élasto-visco-plastique de Chaboche.
- [R5.03.16] : Relation de comportement élasto-plastique à écrouissage cinématique linéaire et isotrope non linéaire.
- [R5.03.20] : Relation de comportement élastique non linéaire en grands déplacements.
- [R5.03.21] : Modélisation élasto-plastique avec écrouissage isotrope en grandes déformations.

## 3 Mode opératoire : les catalogues

### 3.1 Modification du catalogue de `DEFI_MATERIAU`

Le but de l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01] est d'introduire des paramètres de comportement. Ces paramètres peuvent être communs à plusieurs relations de comportement (voir l'exemple ci-dessous pour les relations de comportement `VMIS_ISOT_LINE` et `VMIS_CINE_LINE`).

Il faut donc ajouter dans le catalogue `defi_materiau.capy` (répertoire `catapy/commande`) un mot clé facteur correspondant au type de comportement que l'on souhaite introduire, et sous ce mot clé facteur, ajouter les mots clés simples représentant les paramètres de ce type de comportement.

Exemple :

```
ECRO_LINE = FACT(statut='f',  
                 D_SIGM_EPSI = SIMP(statut='o', typ='R',),  
                 SY          = SIMP(statut='o', typ='R',),), ...
```

signifie que les deux mots-clés `SY` et `D_SIGM_EPSI` sont obligatoires pour `ECRO_LINE` (pour plus de précisions, se reporter à [U1.03.01] : *Superviseur et langage de commandes*)

### 3.2 Modification du catalogue `C_RELATION`

Il faut ajouter à la liste renvoyée par `C_RELATION()` le nom choisi pour la relation de comportement que l'on souhaite introduire ('`MA_RELATION`' dans l'exemple ci-dessous). Le catalogue à modifier est `c_relation.capy` (répertoire `catapy/commun`).

Exemple :

```
def C_RELATION() : return (  
    "ELAS", #COMMUN#  
    ...  
    "LAIGLE",  
    "LEMAITRE",  
    "LEMAITRE_IRRA",  
    "LEMA_SEUIL",  
    "LETK",  
    "MA_RELATION",  
    "MAZARS",  
    "MAZARS_1D",  
    ...  
)
```

### 3.3 Ajouter le catalogue de la loi de comportement

Ce catalogue est à ajouter dans le répertoire `bibpyt/Comportement`.

Exemple : `vmis_cine_line.py`

```
loi = LoiComportement(  
    nom          = 'VMIS_CINE_LINE',  
    doc          = """"Loi de Von Mises... [R5.03.02]""",  
    num_lc       = 3,  
    nb_vari      = 7,  
    nom_vari     = ('XCINXX', 'XCINYY', 'XCINZZ', 'XCINXY', 'XCINXZ',
```

```
        'XCINYZ', 'INDIPLAS',),  
mc_mater      = ('ELAS', 'ECRO_LINE'),  
modelisation  = ('3D', 'AXIS', 'D_PLAN', '1D'),  
deformation   = ('PETIT', 'PETIT_REAC',  
                 'GROT_GDEP', 'GDEF_LOG', 'GDEF_HYPO_ELAS'),  
nom_varc      = ('TEMP',),  
algo_inte     = ('ANALYTIQUE',),  
type_matr_tang = ('PERTURBATION', 'VERIFICATION'),  
proprietes    = None,  
)
```

On fournit donc dans ce catalogue une grande partie des informations relatives au comportement :

- nom : nom de la loi, identique à celui fourni pour COMPR\_INCR / RELATION
- num\_lc : numéro de routine lc00nn
- nb\_vari / nom\_vari : nombre de variables internes, et leurs noms (K8)
- mc\_mater : mots-clés utilisés dans DEFI\_MATERIAU
- modelisation : types de modélisations possibles, pour les comportements de milieux continus : 3D, D\_PLAN, AXIS, C\_PLAN, COMP1D, INCO, GRADEPSI, GRADVARI, ...
- deformation : type de déformations possibles : 'PETIT', 'PETIT\_REAC', 'GROT\_GDEP', 'GDEF\_LOG', 'GDEF\_HYPO\_ELAS'.
- nom\_varc : nom des variables de commandes prises en compte
- algo\_inte : schémas d'intégration possibles: implicite ('ANALYTIQUE', 'NEWTON\_PERT'...), explicite ('RUNGE\_KUTTA')
- type\_matr\_tang : types de matrices tangentes disponibles. Outre la matrice par perturbation, on peut aussi utiliser les matrices sécantes, et la combinaison TANGENTE\_SECANTE.

#### Remarque :

Les noms des variables internes de l'ensemble des comportements sont définis dans le catalogue python `cata_vari.py`, afin de nommer de façon identique les variables internes de même signification. Ce catalogue est disponible dans le répertoire `bibpyt/Comportement`. Pour un nouveau comportement, il est souhaitable de réutiliser des noms déjà existants. Si on ajoute de nouveaux noms, une erreur se produit à l'exécution ; il faut donc modifier `cata_vari.py`, en justifiant son choix lors de la restitution.

#### Attention :

Lorsque que l'on ajoute un nouveau catalogue, bien vérifier la présence de la carte d'ajout en tête de fichier. Elle précise dans quelle bibliothèque python placer le fichier (ici `Comportement`) :

```
#@ AJOUT maloidecomportement Comportement
```

## 4 Mode opératoire : les routines à écrire

C'est à ce niveau que doit être fait le choix du type d'intégration. Il existe quatre possibilités :

1. Utiliser l'architecture de l'environnement d'intégration explicite par un schéma de Runge-Kutta d'ordre 2 [R5.03.14] (ALGO\_INTE='RUNGE\_KUTA') :
  - il s'agit de la méthode la plus simple. Outre la récupération des données matériaux, il suffit d'écrire une routine calculant les dérivées des variables internes
  - le calcul de l'opérateur tangent n'est pas disponible sous cet environnement, c'est l'opérateur de rigidité élastique qui est utilisé
2. Implantation « complète » du nouveau comportement dans l'environnement d'intégration implicite PLASTI [R5.03.14] (ALGO\_INTE='NEWTON') :



- résolution du système non linéaire local par la méthode de Newton. Outre la récupération des données matériaux, il faut écrire plusieurs routines appelées dans l'algorithme de Newton local (évaluation du seuil, calcul du résidu, calcul analytique de la matrice jacobienne...)
  - L'opérateur cohérent est obtenu directement à partir de la jacobienne du système local, et l'opérateur tangent en prédiction est par défaut l'opérateur de rigidité élastique
  - PLASTI ne permet pas d'obtenir des modèles optimisés en temps calcul
3. Implantation « facile » du nouveau comportement dans l'environnement d'intégration implicite PLASTI avec [R5.03.14] (ALGO\_INTE='NEWTON\_PERT') :
- le système non-linéaire local peut être réécrit de telle sorte que l'évaluation du résidu ne nécessite de la part du développeur que de spécifier l'expression des dérivées des variables internes écrites dans le cadre de la méthode 2 (intégration explicite par RK2). On peut donc également réaliser une intégration implicite dans PLASTI avec les deux seules routines nécessaires à l'intégration explicite.
  - La jacobienne du système local est calculée par perturbation, le calcul est donc encore plus coûteux qu'avec la méthode 2. De la même manière, l'opérateur tangent cohérent est obtenu directement à partir de la jacobienne du système local
4. Créer une routine autonome d'intégration complète du comportement :
- permet souvent d'obtenir les modèles les plus performants (par exemple, en réduisant le système à résoudre à une seule équation scalaire, non linéaire, voir par exemple [R5.03.04], [R5.03.16], [R5.03.21], ...)
  - nécessite plus de travail « sur le papier » pour optimiser les équations

#### Attention :

Dans le cas 4, on choisira un numéro de routine *nn* et on écrira la routine *lc00nn*. Dans les autres cas on choisira comme point d'entrée le numéro 32 : *LC0032* appelle *PLASTI* ou *NMVPK* (Runge-Kutta) suivant la valeur de *ALGO\_INTE* choisie par l'utilisateur.

## 4.1 Première possibilité : introduire un nouveau comportement explicite – schéma de RUNGE - KUTTA

Ce type d'intégration correspond à *ALGO\_INTE='RUNGE\_KUTTA'*, c'est la façon la plus rapide d'introduire un nouveau comportement.

Il faut écrire dans un premier temps une routine *XXXMAT* appelée par la routine d'aiguillage *LCMATE* afin de récupérer les paramètres matériaux et la taille du système différentiel non-linéaire à intégrer.

```
SUBROUTINE XXXMAT (FAMI, KPG, KSP, MOD, IMAT, NMAT, MATERD, MATERF,  
                  MATCST, NDT, NDI, NR, NVI, VIND)
```

Arguments en entrée :

```
FAMI, KPG, KSP : famille et numéro de point de gauss / sous-point  
IMAT          : adresse du matériau  
MOD           : type de modelisation  
NMAT         : dimension de MATERD / MATERF
```

Arguments en sortie :

```
MATERD       : coefficients matériau a t  
MATERF       : coefficients matériau a t+dt  
MATERx(*,1) = caractéristiques élastiques
```

```
MATERx(*,2) = caractéristiques plastiques
MATCST      : 'oui' si matériau a t = matériau a t+dt
              'non' sinon
NDT         : nb total de composantes des tenseurs
NDI         : nb de composantes directes des tenseurs
NR          : nb de composantes du système non-linéaire
NVI         : nb de variables internes
```

On donne ci-dessous un exemple pour chacune des deux fonctions principales que doit remplir cette routine

- **AFFECTATION DES DIMENSIONS DU PROBLEME LOCAL ( NDT , NDI , NR , NVI )**

```
NVI=7
IF ( MOD .EQ. '3D' ) THEN
  NDT = 6
  NDI = 3
  NR = NDT+2
ELSE IF ( MOD .EQ. 'D_PLAN' .OR. MOD .EQ. 'AXIS' ) THEN
  NDT = 4
  NDI = 3
  NR = NDT+2
ELSE
  CALL U2MESS('F',...)
ENDIF
```

- **RECUPERATION DU MATERIAU**

```
NOMC(1) = 'E'
NOMC(2) = 'NU'
NOMC(3) = 'ALPHA'
NOMC(4) = 'SY'
NOMC(5) = 'D_SIGM_EPSI'
CALL RCVALB(FAMI,KPG,KSP,'-',IMAT,' ','ELAS',0,' ',
&           0.D0,3,NOMC(1),MATERD(1,1),ICODRE,1)
CALL RCVALB(FAMI,KPG,KSP,'-',IMAT,' ','ECRO_LINE',0,' ',
&           0.D0,2,NOMC(4),MATERD(1,2),ICODRE,1)
```

Il faut ensuite écrire une routine `RKDXXX` appelée par la routine d'aiguillage `LCDVIN` et donnant les dérivées temporelles des variables internes.

Exemples de routine `RKDXXX` : `RKDCHA`, `RKDVEC`, `RKDHAY`.

## 4.2 Deuxième possibilité : introduction « complète » d'un nouveau comportement dans `PLASTI` (implicite)

Cet type d'intégration correspond à `ALGO_INTE='NEWTON'`. L'environnement `PLASTI` permet d'intégrer de manière systématique des relations de comportement non-linéaires par une méthode de Newton locale (au niveau du point de Gauss). Connaissant les contraintes et les variables internes à l'instant  $i-1$  ainsi que l'incrément de déformation totale  $\Delta \varepsilon_i^n$  donné par l'algorithme de Newton global, le système local d'équations à résoudre sous forme purement implicite est écrit de la façon suivante :

$$R(\Delta \mathbf{y}) = \begin{pmatrix} g(\Delta \mathbf{y}) \\ l(\Delta \mathbf{y}) \\ f(\Delta \mathbf{y}) \end{pmatrix} = 0 \quad \text{avec} \quad \Delta \mathbf{y} = \begin{pmatrix} \Delta \sigma \\ \Delta \text{vari} \\ \Delta p \end{pmatrix}$$

La première équation représente par exemple la relation contrainte-déformation élastique (6 équations à 6 inconnues), avec  $\mathbf{A}$  l'opérateur d'élasticité (éventuellement modifié pour les lois avec endommagement),  $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^p$  la variation de déformation plastique et  $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{th}$  la variation de déformation thermique :

$$g(\Delta \mathbf{y}) = \Delta \boldsymbol{\sigma} - \mathbf{A}(\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_i^n - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{th} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^p) = 0$$

la seconde représente l'ensemble des lois d'évolution des différentes variables internes scalaires et/ou vectorielles ( $n_v$  équations scalaires à  $n_v$  inconnues)

$$l(\Delta \mathbf{y}) = 0$$

la dernière représente le critère éventuel de plasticité (1 équation)

$$f(\Delta \mathbf{y}) = 0$$

Ce système de  $6 + n_v(+1)$  équations à  $6 + n_v(+1)$  inconnues est résolu par une méthode de Newton :

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial \Delta \mathbf{y}}(\Delta \mathbf{y}_k) \cdot d[\Delta \mathbf{y}_k] = -R(\Delta \mathbf{y}_k) \\ \Delta \mathbf{y}_{k+1} = \Delta \mathbf{y}_k + d(\Delta \mathbf{y}_k) \end{cases}$$

A convergence, on obtient donc les incréments de contraintes et de variables internes. L'opérateur tangent cohérent est quant à lui calculé de manière systématique à partir de la jacobienne du système local par la routine `LCOPTG` (voir [R5.03.14] pour le détail des équations). Il faut donc programmer a minima une routine définissant le résidu (formé des équations ci-dessus) ainsi qu'une routine construisant la matrice jacobienne. On décrit brièvement ci-dessous l'architecture générale de `PLASTI`, en indiquant au fur et à mesure la liste des routines à écrire.

## Architecture générale de `PLASTI` :

```
CALL LCMATE(...)  
→ écriture nécessaire d'une routine spécifique XXXMAT de récupération du  
matériau identique à RUNGE_KUTTA  
  
IF ( OPT.EQ. 'RAPH_MECA' .OR. OPT.EQ. 'FULL_MECA' ) THEN  
  INTEGRATION ELASTIQUE SUR DT  
  CALL LCELAS(...)  
  → écriture éventuelle d'une routine spécifique XXXELA (par défaut  
  LCELIN : élasticité linéaire)  
  
  PREDICTION ETAT ELASTIQUE A T+DT  
  CALL LCCNVX(..., SEUIL)  
  → écriture nécessaire d'une routine spécifique XXXCVX d' évaluation du  
  seuil  
  
  IF ( SEUIL .GE. 0.D0 ) THEN  
    CALL LCPLAS(...)  
  ENDIF  
ENDIF
```

La routine `LCPLAS` appelle `LCPLNL`, qui réalise la **boucle de Newton** dont la structure est la suivante :

## Notations :

YD=(SIGD,VIND) : vecteur des inconnues (de dimension  $6+n_v$ ) à l'instant T  
YF=(SIGF,VINF) : vecteur des inconnues à l'instant T+DT  
DY : incrément du vecteur des inconnues entre les instants T et T+DT  
DDY : incrément de vecteur des inconnues entre deux itérations de Newton successives  
R : résidu  
DRDY : jacobienne

On résout donc :  $R(DY) = 0$   
Par une méthode de Newton  $DRDY(DYK) DDYK = -R(DYK)$   
 $DYK+1 = DYK + DDYK$  (DY0 DEBUT)  
et on réactualise  $YF = YD + DY$

CALCUL DE LA SOLUTION D'ESSAI INITIALE DU SYSTEME NL EN DY

CALL LCINIT(...DY,...)

→ écriture éventuelle d'une routine spécifique XXXINI (par défaut DY est initialisé à 0)

ITERATIONS DE NEWTON

ITER = 0

1 CONTINUE

ITER = ITER + 1

INCREMENTATION DE  $YF = YD + DY$

CALL LCSOVN(NR, YD, DY, YF)

CALCUL DES TERMES DU SYSTEME A T+DT = -R(DY)

CALL LCRESI(..., DY, R, IRET)

→ écriture nécessaire d'une routine spécifique XXXRES de calcul du résidu

CALCUL DU JACOBIEN DU SYSTEME A T+DT = DRDY(DY)

si ALGO\_INTE='NEWTON' calcul exact de la jacobienne

CALL LCJACB(...DY,...DRDY, IRET)

→ écriture nécessaire d'une routine spécifique XXXJAC

sinon si ALGO\_INTE='NEWTON\_PERT', calcul par perturbation (cf § 4.3)

CALL LCJACP(...DRDY,...)

RESOLUTION DU SYSTEME LINEAIRE  $DRDY(DY).DDY = -R(DY)$

CALL LCEQMN(NR, DRDY, DRDY1)

CALL LCEQVN(NR, R, DDY)

CALL MGAUSS('NCWP', DRDY1, DDY, NR, NR, 1, RBID, IRET)

REACTUALISATION DE  $DY = DY + DDY$

CALL LCSOVN ( NR , DDY , DY , DY )

RECHERCHE LINEAIRE dans le cas ALGO\_INTE='NEWTON\_RELI'

CALL LCRELI ( ... )

ESTIMATION DE LA CONVERGENCE

CALL LCCONV(DY, DDY, NR, ITMAX, TOLER, ..., R, ..., IRTET)

→ écriture éventuelle d'une routine spécifique XXXCVG du critère de convergence (critère relatif par défaut dans LCCONG)

IF ( IRTET.GT.0 ) GOTO 1

CONVERGENCE -> INCREMENTATION DE  $YF = YD + DY$

CALL LCSOVN ( NDT+NVI , YD , DY , YF )

MISE A JOUR DE SIGF , VINF

CALL LCEQVN ( NDT , YF(1) , SIGF )

```
CALL LCEQVN ( NVI-1 , YF(NDT+1) , VINF )
```

En résumé, pour une introduction « complète » d'un nouveau comportement dans `PLASTI`, il faut nécessairement écrire les routines spécifiques suivantes :

- `XXXMAT` appelée par `LCMATE` : récupération du matériau et de la taille du problème local
- `XXXCVX` appelée par `LCCNVX` : évaluation du seuil
- `XXXRES` appelée par `LCRESI` : calcul du résidu
- `XXXJAC` appelée par `LCJACB` : calcul de la jacobienne

Il peut aussi être utile, selon le besoin, d'écrire les routines spécifiques suivantes :

- `XXXELA` appelée par `LCELAS` : intégration élastique (si élasticité non-linéaire)
- `XXXINI` appelée par `LCINIT` : initialisation (pour une initialisation autre que `DY0=0`)
- `XXXCVG` appelée par `LCCONV` : pour modifier le critère de convergence

## 4.3 Troisième possibilité : utilisation des routines de l'intégration explicite dans une intégration implicite avec `PLASTI`

### 4.3.1 Principe

Ce dernier cas correspond à `ALGO_INTE_='NEWTON_PERT'`, il s'agit de la méthode d'implantation « facile » du nouveau comportement dans l'environnement d'intégration implicite `PLASTI`. Il est possible d'utiliser directement les deux routines `XXXMAT` et `RKDXXX` (récupération des données matériau, et dérivées des variables internes) utilisées avec `ALGO_INTE_='RUNGE_KUTTA'` pour réaliser une intégration implicite. En effet, le système d'équations différentielles résolu par `RUNGE_KUTTA` peut s'écrire :

$$\begin{cases} \Delta \sigma = \mathbf{A} (\Delta \varepsilon_i^n - \Delta \varepsilon^{th} - \Delta \varepsilon^p(\mathbf{Y})) \\ \frac{d\mathbf{Y}}{dt} = F(\mathbf{Y}, t; \sigma) \end{cases}$$

où  $\mathbf{Y}$  représente l'ensemble des variables internes du modèle. La relation entre le tenseur des contraintes et la partie élastique du tenseur des déformations est généralement linéaire, mais peut être évaluée de façon non linéaire par une expression spécifique.

Une fois programmée la routine `RKDXXX` permettant de calculer  $\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = F(\mathbf{Y}, t; \sigma)$ , il est possible de l'utiliser pour une intégration implicite, ce qui consiste à résoudre (cf. [R5.03.14]) :

$$R(\Delta \mathbf{Z}) = 0 = \begin{bmatrix} R_1(\Delta \mathbf{Z}) \\ R_2(\Delta \mathbf{Z}) \end{bmatrix}, \text{ avec } \Delta \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \Delta \sigma \\ \Delta \mathbf{Y} \end{pmatrix} = \mathbf{Z}(t + \Delta t) - \mathbf{Z}(t)$$

- Le premier système d'équations représente la relation contrainte - déformation élastique

$$R_1(\Delta \mathbf{Z}) = \mathbf{A}^{-1} \sigma - (\Delta \varepsilon_i^n - \Delta \varepsilon^{th} - \Delta \varepsilon^p(\mathbf{Y})) = \mathbf{A}^{-1} \sigma - G(\mathbf{Y}) = 0$$

Par convention, les premières valeurs de  $\mathbf{Y}$  représentent la variation de déformation plastique, pour faciliter le calcul de  $G(\mathbf{Y})$  (voir la routine `LCRESA` pour plus de détails)

- Le deuxième exprime les lois d'évolution des différentes variables internes, soit après discrétisation temporelle par un schéma d'Euler implicite :

$$R_2(\Delta \mathbf{Z}) = \Delta \mathbf{Y} - \Delta t \cdot F(\mathbf{Y}, \sigma) = 0$$

Ce système est résolu par la méthode de Newton proposée dans l'environnement `PLASTI` et décrite au paragraphe précédent:

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial \Delta Z} d(\Delta Z_k) = -R(\Delta Z_k) \\ \Delta Z_{k+1} = \Delta Z_k + d(\Delta Z_k) \end{cases}$$

Les quantités  $G$  et  $F$  intervenant dans le résidu sont calculées par la routine « explicite » `RKDXXX` à écrire, et le résidu est construit automatiquement par la routine `LCRESA`. Le matrice jacobienne est calculée automatiquement par perturbation (routine `LCJACP`). L'opérateur tangent cohérent est quant à lui calculé de manière systématique à partir de la jacobienne (routine `LCOPTG`, voir [R5.03.14] pour le détail des équations).

En résumé, ce procédé permet, avec les deux seules routines nécessaires à l'intégration explicite, (coefficients matériau et calcul des dérivées des variables internes) d'utiliser une intégration implicite, et de bénéficier d'une matrice tangente. Ce procédé est économique en termes de temps de développement, mais *a priori* moins efficace en temps CPU qu'une matrice jacobienne programmée explicitement.

On détaille ci-dessous le calcul de l'opérateur tangent par perturbation, ainsi que le critère de convergence de l'algorithme de Newton local.

### **Calcul par perturbation ( `LCJACP` ) : différences finies d'ordre 2**

- Initialisation de la perturbation :  $\eta = 10^{-7} \|\Delta Z\|$
- boucle sur les colonnes  $j$  de la matrice à remplir :
  - calcul de  $R(\Delta Z + \eta I_j)$  avec  $I_j = [0 \ 0 \ \dots \ 1 \ \dots \ 0 \ 0]^T$  vecteur nul sauf à la ligne  $j$
  - calcul de  $R(\Delta Z - \eta I_j)$
  - calcul de la colonne  $j$  :  $\left[ \frac{\partial R}{\partial \Delta Z} \right]_{\dots, j} \simeq \frac{R(\Delta Z + \eta I_j) - R(\Delta Z - \eta I_j)}{2\eta}$

### **Critère de convergence ( `LCCONG` ) :**

On sépare les deux blocs  $R_1$  et  $R_2$  du résidu pour éviter les problèmes dus à des ordres de grandeur différents. A chaque itération  $k$  de l'algorithme de Newton local, on calcule :

$$err_1 = \frac{\|R_1(\Delta Z_k)\|_\infty}{\|R_1(\Delta Z_0)\|_\infty}, \text{ avec } R_1(\Delta Z_0) = \Delta \epsilon_i^n \text{ car on a } \Delta Z_0 = 0 \text{ à l'initialisation. (cf. § 4.2)}$$
$$err_2 = \frac{\|R_2(\Delta Z_k)\|_\infty}{\|Y(t) + \Delta Y_k\|_\infty}$$

Le critère d'arrêt est alors le suivant :

$$\max(err_1, err_2) < \xi, \text{ où } \xi \text{ est donné par } \text{RESI\_INTE\_RELA}.$$

## 4.3.2 Exemple

Un exemple : la loi visco-élasto-plastique de Hayhurst.

Routine de lecture des coefficients matériau (appelée par la routine d'aiguillage `LCMATT`) :

- HAYMAT

Routine de calcul des dérivées des variables internes (appelée par la routine d'aiguillage LCDVIN) :

- RKDHAY

Les développements explicite / implicite de cette relation de comportement sont testés et comparés dans le cas-test ssnv225 [V6.04.225]. Il s'agit d'un test au point matériel de fluage en grandes déformations permettant de valider les capacités du modèle de HAYHURST à représenter le fluage primaire, secondaire et tertiaire. Voici les caractéristiques d'exécution pour ce test en version 11.2 :

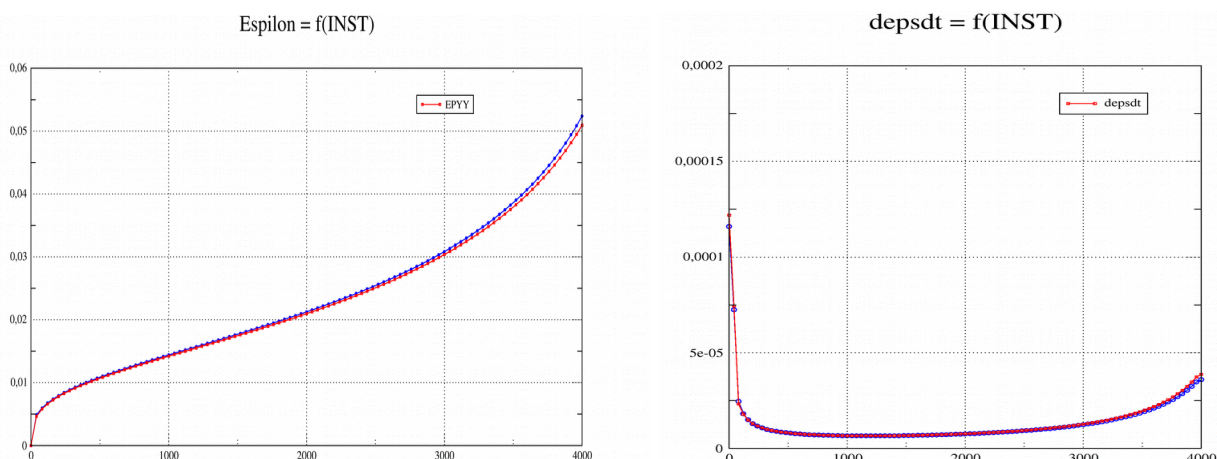
Modélisation A : ALGO\_INTE='RUNGE\_KUTTA'

- temps CPU : 90.59 s
- Nombre de pas de temps : 1660
- Nombre d'itérations de Newton : 7615

Modélisation B : ALGO\_INTE='NEWTON\_PERT' :

- temps CPU : 27.38 s
- Nombre de pas de temps : 520
- Nombre d'itérations de Newton : 1404

Les résultats sont quasi identiques :



## 4.4 Quatrième possibilité : écrire une routine 1c00nn autonome

### 4.4.1 1c00nn : routine relative à un point d'intégration d'un élément, spécifique à une loi de comportement

Chercher dans le répertoire bibfor/algorithm un numéro de routine 1c00nn non utilisé ( $50 < nn < 100$ ) et partir de cette routine vide.

#### Remarque :

L'appel à 1c00nn par 1c0000 (qui est la routine appelant toute les routines d'intégration des comportements disponibles dans Code\_Aster) est déjà écrit. Cependant, il faut s'assurer que les arguments (ainsi que l'ordre de ces arguments) choisis à la déclaration de 1c00nn par le développeur soient les mêmes qu'à l'appel dans 1c0000.

Les arguments d'entrée d'une routine 1c00nn sont *a minima* :

FAMI famille de points de gauss (RIGI, MASS, ...)

KPG, KSP numéro du point de gauss et du sous-point  
NDIM dimension de l'espace ( 3d=3 , 2d=2 , 1d=1 )  
IMATE adresse du matériau  
COMPOR infos sur le comportement  
compor(1) = relation de comportement (vmis\_cine...)  
compor(2) = nombre de variables internes  
compor(3) = type de déformation (petit,green...)  
CRIT critères locaux  
crit(1) = nombre d'itérations maxi a convergence (ITER\_INTE\_MAXI)  
crit(3) = valeur de la tolérance de convergence (RESI\_INTE\_REL)  
INSTAM instant t-  
INSTAP instant t = t- + dt  
EPSM déformation totale a t- (ou éventuellement le gradient de transformation suivant le type de déformation : les arguments de la routine appelante, lc0000, contiennent la dimension de EPSM, et DEPS),  
DEPS incrément de déformation totale (même remarque)  
SIGM contrainte a t-  
VIM variables internes a t-  
OPTION option de calcul  
RIGI\_MECA\_TANG -> dsidep(t)  
FULL\_MECA -> dsidep(t+dt) , sig(t+dt)  
RAPH\_MECA -> sig(t+dt)  
ANGMAS les trois angles (nautiques ou d'Euler) du mot\_clef massif  
TYPMOD type de modélisation : 3D, AXIS, D\_PLAN, C\_PLAN,...  
ICOMP compteur pour le redécoupage local du pas de temps  
NVI nombre de variables internes du comportement

les arguments de sortie sont, selon l'option de calcul :

VIP variables internes a l'instant actuel (options RAPH\_MECA et FULL\_MECA)  
SIGP contraintes a l'instant actuel (options RAPH\_MECA et FULL\_MECA)  
DSIDEP opérateur tangent cohérent ou en vitesse (option FULL\_MECA ou RIGI\_MECA\_TANG).  
CODRET code retour permettant d'indiquer (s'il est non nul) une problème d'intégration locale, donc d'effectuer un redécoupage du pas de temps

## Remarques :

- le cas échéant, il est possible d'utiliser également un tableau de travail en entrée (*WKIN* dans *LC0000*, de dimension *NWKIN*). Ce tableau contient des arguments supplémentaires, par exemple une longueur caractéristique dans le cas des modèles non locaux...
- De même, il est possible de transférer des valeurs en sortie de la routine *lc00nn* (tableau *WKOUT*). Mais dans ce cas il est nécessaire de définir la dimension et l'usage de ce tableau dans les routines élémentaires appelant le comportement – en plasticité 3D HPP, par exemple, *TE0139* / *NMPL3D* / *NMCOMP*)
- Attention, dans le cas *RIGI\_MECA\_TANG*, les tableaux relatifs aux contraintes et variables internes en fin de pas de temps ne sont pas alloués. Il ne faut donc pas les utiliser pour calculer la matrice tangente de prédiction.

## 4.4.2 Organisation de la routine à écrire

On prend comme au § 3.3 l'exemple de la loi de Von Mises à écrouissage cinématique linéaire *VMIS\_CINE\_LINE* (num\_lc=3 dans *vmis\_cine\_line.py*):

```
SUBROUTINE LC0003 (FAMI, KPG, KSP, NDIM, IMATE, COMPOR, CRIT, INSTAM,
```



```
&          INSTAP,EPSM,DEPS,SIGM,VIM,OPTION,ANGMAS,SIGP,VIP,  
&          TAMPON,TYPMOD,ICOMP,NVI,DSIDEP,CODRET)
```

Cette routine est en fait une routine d'aiguillage pour les comportements VMIS\_CINE\_LINE et VMIS\_ECFMI\_\*. L'intégration de VMIS\_CINE\_LINE est réalisée dans la routine NMCINE, appelée par 1c0003 et dont le contenu est décrit ici brièvement :

- **LECTURE DES CARACTERISTIQUES ELASTIQUES DU MATERIAU (TEMPS T = +)**

```
NOMRES (1)='E'  
NOMRES (2)='NU'  
CALL RCVALB(FAMI,KPG,KSP,'+',IMATE,' ','ELAS',0,' ',  
&          0.D0,2,NOMRES,VALRES,ICODRE,2)  
E = VALRES (1)  
NU = VALRES (2)
```

**Remarque :**

*RCVALB est une routine générale permettant d'interpoler les valeurs des coefficients matériaux par rapport aux variables de commandes dont ils dépendent (voir les utilitaires).*

*RCVARC est une routine qui permet de récupérer la valeur d'une variables de commandes (température, séchage, irradiation, ...) à l'instant considéré, et au point de Gauss considéré (voir les utilitaires). Exemple :*

```
CALL RCVARC(' ','TEMP','- ',FAMI,KPG,KSP,TP,IRET)  
CALL RCVARC(' ','TEMP','+ ',FAMI,KPG,KSP,TP,IRET)
```

- **LECTURE DES CARACTERISTIQUES D'ECROUISSAGE**

```
NOMRES (1)='D_SIGM_EPSI'  
NOMRES (2)='SY'  
CALL RCVALB(FAMI,KPG,KSP,'+',IMATE,' ','ECRO_LINE',0,' ',  
&          0.D0,2,NOMRES,VALRES,ICODRE,2)  
DSDE=VALRES (1)  
SIGY=VALRES (2)  
C = 2.D0/3.D0*DSDE/(1.D0-DSDE/E)
```

- **CALCUL DES CONTRAINTES ELASTIQUES ET DU CRITERE DE VON MISES**

```
DO 110 K=1,3  
  DEPSTH(K) = DEPS(K) -EPSTHE  
  DEPSTH(K+3) = DEPS(K+3)  
110 CONTINUE  
  EPSMO = (DEPSTH(1)+DEPSTH(2)+DEPSTH(3))/3.D0  
  DO 115 K=1,NDIMSI  
    DEPSDV(K) = DEPSTH(K) - EPSMO * KRON(K)  
115 CONTINUE  
  SIGMO = (SIGM(1)+SIGM(2)+SIGM(3))/3.D0  
  SIELEQ = 0.D0  
  DO 114 K=1,NDIMSI  
    SIGDV(K) = SIGM(K) - SIGMO*KRON(K)  
    SIGDV(K) = DEUXMU/DEUMUM*SIGDV(K)  
    SIGEL(K) = SIGDV(K) + DEUXMU * DEPSDV(K)  
    SIELEQ = SIELEQ + (SIGEL(K)-C/CM*VIM(K))**2  
114 CONTINUE  
  SIGMO = TROISK/TROIKM * SIGMO  
  SIELEQ = SQRT(1.5D0*SIELEQ)  
  SEUIL = SIELEQ - SIGY  
  DP = 0.D0  
  PLASTI=VIM(7)
```

- **CALCUL DES CONTRAINTES ET DES VARIABLES INTERNES**

Les expressions des contraintes et des variables internes (RAPH\_MECA et FULL\_MECA) sont données dans [R5.03.02]

```
IF ( OPTION(1:9) .EQ. 'RAPH_MECA' .OR.  
&    OPTION(1:9) .EQ. 'FULL_MECA' ) THEN  
  IF (SEUIL.LT.0.D0) THEN  
    VIP(7) = 0.D0  
    DP = 0.D0  
    SIELEQ = 1.D0  
    A1 = 0.D0  
    A2 = 0.D0  
  ELSE  
    VIP(7) = 1.D0  
    DP = SEUIL/(1.5D0*(DEUXMU+C))  
    A1 = (DEUXMU/(DEUXMU+C))*(SEUIL/SIELEQ)  
    A2 = (C / (DEUXMU+C))*(SEUIL/SIELEQ)  
  ENDIF  
  PLASTI=VIP(7)  
  DO 160 K = 1,NDIMSI  
    SIGDV(K) = SIGEL(K) - A1*(SIGEL(K)-VIM(K)*C/CM)  
    SIGP(K) = SIGDV(K) + (SIGMO + TROISK*EPSMO)*KRON(K)  
    VIP(K) = VIM(K)*C/CM + A2*(SIGEL(K)-VIM(K)*C/CM)  
160  CONTINUE  
ENDIF
```

- **CALCUL DE L'OPERATEUR TANGENT 'DSIPSEP' : RIGI\_MECA\_TANG (en vitesse) ou FULL\_MECA (cohérent)**

```
IF ( OPTION(1:14) .EQ. 'RIGI_MECA_TANG' .OR.  
&    OPTION(1:9) .EQ. 'FULL_MECA' ) THEN  
  CALL MATINI(6,6,0.D0,DSIDEP)  
  DO 120 K=1,6  
    DSIDEP(K,K) = DEUXMU  
120  CONTINUE  
  IF ( OPTION(1:14) .EQ. 'RIGI_MECA_TANG' ) THEN  
    DO 174 K = 1,NDIMSI  
      SIGDV(K) = SIGDV(K) - VIM(K)*C/CM  
174  CONTINUE  
  ELSE  
    DO 175 K = 1,NDIMSI  
      SIGDV(K) = SIGDV(K) - VIP(K)  
175  CONTINUE  
  ENDIF  
  SIGEPS = 0.D0  
  DO 170 K = 1,NDIMSI  
    SIGEPS = SIGEPS + SIGDV(K)*DEPSDV(K)  
170  CONTINUE  
  A1 = 1.D0/(1.D0+1.5D0*(DEUXMU+C)*DP/SIGY)  
  A2 = (1.D0+1.5D0*C*DP/SIGY)*A1  
  IF(PLASTI.GE.0.5D0.AND.SIGEPS.GE.0.D0) THEN  
    COEF = -1.5D0*(DEUXMU/SIGY)**2 / (DEUXMU+C) * A1  
    DO 135 K=1,NDIMSI  
      DO 135 L=1,NDIMSI  
        DSIDEP(K,L) = A2 * DSIDEP(K,L) + COEF*SIGDV(K)*SIGDV(L)  
135  CONTINUE  
    LAMBDA = LAMBDA + DEUXMU**2*A1*DP/SIGY/2.D0
```

```
ENDIF
DO 130 K=1, 3
  DO 131 L=1, 3
    DSIDEK(K,L) = DSIDEK(K,L) + LAMBDA
131  CONTINUE
130  CONTINUE
ENDIF
```

## 5 Cas particulier des lois MFront

En complément du document [u2.10.02] qui décrit comment utiliser une loi de comportement MFront en mode prototype, on précise dans ce paragraphe les particularités des lois de comportement MFront qui sont officiellement (sous assurance qualité) intégrées à code\_aster.

Le nom du fichier MFront doit être identique au nom du comportement décrit dans le fichier.

Quand on compile les lois de comportement MFront officielles, la procédure de construction doit savoir quels fichiers sont produits par la conversion du fichier MFront en C++. Habituellement, deux fichiers sont produits : un du nom du comportement et un nommé `aster` + nom du comportement.

Si un autre fichier est produit, il faut l'indiquer dans le fichier MFront par exemple (dans `PlasticityTH.mfront`) :

```
//output Acier_ElasticYield-mfront
```

### 5.1 Catalogue pour DEFI\_MATERIAU et RELATION

Le catalogue de commande des paramètres matériaux est automatiquement intégré dans la commande DEFI\_MATERIAU par la procédure de description (lors de l'étape `waf install`) :

- le mot-clé facteur est le nom du comportement (exemple : `AnisoLemaitre`),
- le nom des paramètres matériaux correspond aux `@MaterialProperty`.

Si les paramètres sont des tableaux (exemple : `@MaterialProperty real a[3]`), ils seront nommés `a_0`, `a_1` et `a_2`.

Un deuxième mot-clé facteur suffixé par `_FO` (exemple : `AnisoLemaitre_FO`) est créé dans lequel tous les paramètres sont des fonctions.

Le nom du comportement est automatiquement ajouté pour le mot-clé RELATION.

### 5.2 Catalogue du comportement

La description du comportement est légèrement différente. Il faut créer un objet de type `LoiComportementMFront` et indiquer le nom du symbole produit lors de la compilation.

## 6 Validation et maintenance

La réflexion sur les tests de validation et d'identification peut être amorcée très tôt, avant même le développement proprement dit. On peut distinguer :

- les fichiers de commande (souvent simple, utilisant par exemple `SIMU_POINT_MAT`) permettant d'identifier certains paramètres (à l'aide de `MACR_RECAL`).
- Les tests à restituer : il doivent permettre de valider le comportement dans tous ses aspects, pour une gamme de valeur de paramètres couvrant correctement le domaine de validité. Certains tests sont quasiment obligatoires :
- les tests de robustesse et d'invariance par rapport à une rotation, un changement d'unité (`COMP001`, `COMP002`, `COMP003`)
- les tests vérifiant la bonne prise en compte des variables de commandes (`COMP008`, `COMP010`)

De plus le développeur peut être amené à corriger ou analyser son comportement suite à une anomalie rencontrée lors d'une étude. Dans ce cas, en plus des techniques habituelles de débogage, il est possible d'utiliser une fonctionnalité mise en œuvre en cas d'échec d'intégration du comportement : les premiers points en échec produisent un petit fichier de commandes permettant de rejouer la scène avec `SIMU_POINT_MAT`, pour mieux analyser le problème, essayer d'autres méthodes. Il suffit de recopier la définition du matériau ; toutes les autres données (contraintes, déformations, variables internes initiales, et incrément de déformation permettent de simuler le comportement à l'instant et au point où l'échec s'est produit. Par exemple pour le test `forma03c` :

```
#-----
# test pour analyser l'échec d'intégration sur la maille <M83>, point <3>
#-----
DEBUT ()

# recopier DEFI_MATERIAU(...)
# COURBE DE TRACTION
CTRAC = LIRE_FONCTION (UNITE=21, NOM_PARA='EPSI', PROL_DROITE='CONSTANT',)

MAT=DEFI_MATERIAU (ELAS=_F (E=200000., NU=0.3), TRACTION=_F (SIGM=CTRAC))

LIST=DEFI_LIST_REEL (DEBUT=1.9440000000000000E+02,
                    INTERVALLE=_F (JUSQU_A= 2.1870000000000000E+02, NOMBRE=1))

DEFLIST = DEFI_LIST_INST (DEFI_LIST=_F (LIST_INST=LIST,),
                        ECHEC=_F (SUBD_NIVEAU=10, SUBD_PAS=4),)

EXX=DEFI_FONCTION (NOM_PARA='INST',
                  VALE=( 1.9440000000000000E+02, -9.407813329102166E-04,
                        2.1870000000000000E+02, 7.373776084156800E+06))

EYY=DEFI_FONCTION (NOM_PARA='INST',
                  VALE=( 1.9440000000000000E+02, 1.718362911427018E-04,
                        2.1870000000000000E+02, -5.221483651275956E+06))

EZZ=DEFI_FONCTION (NOM_PARA='INST',
                  VALE=(1.9440000000000000E+02, 0.0000000000000000E+00,
                        2.1870000000000000E+02, -9.224110429927666E+05))

EXY=DEFI_FONCTION (NOM_PARA='INST',
                  VALE=( 1.9440000000000000E+02, 3.621278829822514E-04,
                        2.1870000000000000E+02, -4.710098874951571E+06))

RESU=SIMU_POINT_MAT ( INFO=1, MATER=MAT, INCREMENT=_F (LIST_INST=DEFLIST),
                    EPSI_IMPOSE=_F (EPXX=EXX, EPHY=EYY, EPZZ=EZZ, EPXY=EXY),
                    SUPPORT='ELEMENT', MODELISATION='C_PLAN',
                    EPSI_INIT=_F ( EPXX=-9.407813329102166E-04,
                                    EPHY=1.718362911427018E-04,
                                    EPZZ= 0.0000000000000000E+00,
                                    EPXY=3.621278829822514E-04,
                                    EPXZ=0.0000000000000000E+00,
                                    EPHYZ= 0.0000000000000000E+00 ),
                    SIGM_INIT=_F ( SIXX=-1.887253339740370E+02,
                                    SIYY=-2.497632316081525E+01,
                                    SIZZ= 0.0000000000000000E+00,
                                    SIXY=7.537194347798921E+01,
                                    SIXZ=0.0000000000000000E+00,
                                    SIYZ= 0.0000000000000000E+00 ),
                    VARI_INIT=_F (VALE=(3.931095545774485E-05,
                                        1.0000000000000000E+00,)),
                    COMPORTEMENT=_F (RELATION='VMIS_ISOT_TRAC', ITER_INTE_MAXI=20,),
                    NEWTON=_F (REAC_ITER=1),)

FIN ()
```