

## Opérateur CALC\_CHAMP

---

### 1 But

---

Créer ou compléter un `résultat` en calculant des champs par élément ou aux nœuds (contraintes, déformations, ...).

Le concept résultat produit est soit créé, soit modifié, c'est-à-dire que l'appel à `CALC_CHAMP` se fait de la façon suivante :

```
resu = CALC_CHAMP ( RESULTAT = resu ... , reuse = resu , ... )
```

ou bien

```
resul = CALC_CHAMP ( RESULTAT = resu, ... )
```

## Table des Matières

1	But.....	1
2	Syntaxe.....	3
2.1	Opérandes RESULTAT/MODELE/CHAM_MATER/CARA_ELEM/EXCIT.....	8
2.1.1	Opérandes RESULTAT .....	8
2.1.2	Opérandes MODELE / CHAM_MATER / CARA_ELEM.....	8
2.1.3	Mot clé EXCIT.....	8
2.2	Sélection des mailles concernées par le calcul.....	8
2.3	Sélection des numéros d'ordre.....	9
2.4	Localisation des champs.....	9
2.5	Dépendance des champs.....	10
2.6	Opérandes pour les options mécaniques.....	10
2.6.1	Options de calcul des contraintes (Opérande CONTRAINTE).....	10
2.6.2	Options de calcul des déformations (Opérande DEFORMATION).....	12
2.6.3	Options d'extraction des variables internes (Opérande VARI_INTERNE).....	14
2.6.4	Options de calcul d'énergie (Opérande ENERGIE).....	16
2.6.5	Options de calcul de critères (Opérande CRITERES).....	18
2.6.6	Option de calcul des flux hydrauliques (Opérande HYDRAULIQUE).....	22
2.7	Opérandes pour les options thermiques.....	22
2.7.1	Opérande THERMIQUE.....	23
2.8	Opérandes pour les options acoustiques.....	23
2.8.1	Opérande ACOUSTIQUE.....	23
2.9	Opérande pour les forces et les réactions nodales.....	24
2.9.1	Opérande FORCE.....	24
2.9.2	Exemple 1: Structure chargée avec force nodale (2 éléments QUAD4).....	27
2.9.3	Exemple 2 : Structure avec chargement température.....	28
2.10	Calcul d'un champ utilisateur.....	28
2.10.1	Opérande NOM_CHAM.....	29
2.10.2	Opérande CRITERE.....	29
2.10.3	Opérande FORMULE.....	29
2.10.4	Opérande NUME_CHAM_RESU.....	29
2.10.5	Exemple de calcul d'un champ utilisateur.....	29
2.11	Opérande TITRE.....	30

## 2 Syntaxe

```
resu  [*] = CALC_CHAMP

(  ◇ reuse = resu,
  ◇ MODELE =          mo,                [modele]
  ◇ CHAM_MATER =     chmater,            [cham_mater]
  ◇ CARA_ELEM =      carac,              [cara_elem]
  ◇ EXCIT = _F (     ◇ CHARGE = l_charge, [l_char_meca]
                    ◇ / COEF_MULT = cm,  [R]
                    ◇ / FONC_MULT = fm,  [fonction]
                    ◇ TYPE_CHARGE = 'FIXE',
                )
  ◇ # Sélection des mailles concernées par le calcul
  / TOUT = 'OUI',                        [DEFAULT]
  / | GROUP_MA = l_grma ,                [l_gr_maille]
  / | MAILLE = l_mail ,                  [l_maille]

  ◇ # Sélection des numéros d'ordre
  / TOUT_ORDRE = 'OUI',
  / NUME_ORDRE = l_nuor ,                [l_I]
  / LIST_ORDRE = l_nuor ,                [listis]
  / NUME_MODE = l_numo ,                 [l_I]
  / NOEUD_CMP = l_nomo ,                 [l_K16]
  / NOM_CAS = nocas ,                    [K16]
  / INST = l_inst ,                      [l_R]
  / FREQ = l_freq ,                      [l_R]
  / LIST_INST = l_inst ,                  [listr8]
  / LIST_FREQ = l_freq ,                  [listr8]

  ◇ | CRITERE = / 'RELATIF',              [DEFAULT]
  / 'ABSOLU',
  | PRECISION = / prec,
  / 1.0E-6,                               [DEFAULT]

# options pour des résultats mécaniques linéaires

  ◇ RESULTAT = resu,

# options de calcul des contraintes (éléments de milieu continu 2D et 3D)

  ◇ CONTRAINTE = | 'EFGE_ELGA'
                  | 'EFGE_ELNO'
                  | 'EFGE_NOEU'
                  | 'SIEF_ELGA'
                  | 'SIEF_ELNO'
                  | 'SIEF_NOEU'
                  | 'SIGM_ELGA'
                  | 'SIGM_ELNO'
                  | 'SIGM_NOEU'
                  | 'SIPM_ELNO'
                  | 'SIPO_ELNO'
                  | 'SIPO_NOEU'
                  | 'SIRO_ELEM'
```

```
# options de calcul des déformations

◇ DEFORMATION =      | 'DEGE_ELGA '
                    | 'DEGE_ELNO '
                    | 'DEGE_NOEU '
                    | 'EPME_ELGA '
                    | 'EPME_ELNO '
                    | 'EPME_NOEU '
                    | 'EPSG_ELGA '
                    | 'EPSG_ELNO '
                    | 'EPSG_NOEU '
                    | 'EPSI_ELGA '
                    | 'EPSI_ELNO '
                    | 'EPSI_NOEU '
                    | 'EPVC_ELGA '
                    | 'EPVC_ELNO '
                    | 'EPVC_NOEU '

# options de calcul d'énergies

◇ ENERGIE =          | 'DISS_ELEM '
                    | 'DISS_ELGA '
                    | 'DISS_ELNO '
                    | 'DISS_NOEU '
                    | 'ECIN_ELEM '
                    | 'ENEL_ELEM '
                    | 'ENEL_ELGA '
                    | 'ENEL_ELNO '
                    | 'ENEL_NOEU '
                    | 'EPOT_ELEM '
                    | 'ETOT_ELEM '
                    | 'ETOT_ELGA '
                    | 'ETOT_ELNO '
                    | 'ETOT_NOEU '

# options de calcul de critères

◇ CRITERES =         | 'EPEQ_ELGA '
                    | 'EPEQ_ELNO '
                    | 'EPEQ_NOEU '
                    | 'EPMQ_ELGA '
                    | 'EPMQ_ELNO '
                    | 'EPMQ_NOEU '
                    | 'SIEQ_ELGA '
                    | 'SIEQ_ELNO '
                    | 'SIEQ_NOEU '

# options d'interpolation et d'extraction des variables internes

◇ VARI_INTERNE =     | 'VARC_ELGA '
```

# options pour les résultats non linéaires (produits  
par STAT\_NON\_LINE ou DYNA\_NON\_LINE) :

◆ RESULTAT = resu, / [evol\_noli]

# options de calcul des contraintes (éléments de milieu continu 2D et 3D)

◇ CONTRAINTE = | 'EFGE\_ELGA'  
| 'EFGE\_ELNO'  
| 'EFGE\_NOEU'  
| 'SIEF\_ELNO'  
| 'SIEF\_NOEU'  
| 'SIGM\_ELGA'  
| 'SIGM\_ELNO'  
| 'SIGM\_NOEU'  
| 'SIPO\_ELNO'  
| 'SIPO\_NOEU'  
| 'SIRO\_ELEM'

# options de calcul des déformations

◇ DEFORMATION = | 'DEGE\_ELGA'  
| 'DEGE\_ELNO'  
| 'DEGE\_NOEU'  
| 'EPFD\_ELGA'  
| 'EPFD\_ELNO'  
| 'EPFD\_NOEU'  
| 'EPFP\_ELGA'  
| 'EPFP\_ELNO'  
| 'EPFP\_NOEU'  
| 'EPME\_ELGA'  
| 'EPME\_ELNO'  
| 'EPME\_NOEU'  
| 'EPMG\_ELGA'  
| 'EPMG\_ELNO'  
| 'EPMG\_NOEU'  
| 'EPSG\_ELGA'  
| 'EPSG\_ELNO'  
| 'EPSG\_NOEU'  
| 'EPSI\_ELGA'  
| 'EPSI\_ELNO'  
| 'EPSI\_NOEU'  
| 'EPSP\_ELGA'  
| 'EPSP\_ELNO'  
| 'EPSP\_NOEU'  
| 'EPVC\_ELGA'  
| 'EPVC\_ELNO'  
| 'EPVC\_NOEU'

# options de calcul d'énergies

◇ ENERGIE = | 'DISS\_ELEM'  
| 'DISS\_ELGA'  
| 'DISS\_ELNO'  
| 'DISS\_NOEU'  
| 'ENEL\_ELEM'  
| 'ENEL\_ELGA'  
| 'ENEL\_ELNO'  
| 'ENEL\_NOEU'

```

| 'ETOT_ELEM'
| 'ETOT_ELGA'
| 'ETOT_ELNO'
| 'ETOT_NOEU'

# options de calcul de critères

◇ CRITERES = | 'DERA_ELGA'
| 'DERA_ELNO'
| 'DERA_NOEU'
| 'ENDO_ELGA'
| 'ENDO_ELNO'
| 'ENDO_NOEU'
| 'EPEQ_ELGA'
| 'EPEQ_ELNO'
| 'EPEQ_NOEU'
| 'EPMQ_ELGA'
| 'EPMQ_ELNO'
| 'EPMQ_NOEU'
| 'INDL_ELGA'
| 'PDIL_ELGA'
| 'SIEQ_ELGA'
| 'SIEQ_ELNO'
| 'SIEQ_NOEU'

# options d'interpolation et d'extraction des variables internes

◇ VARI_INTERNE = | 'VAEX_ELGA'
| ♦ NOM_VARI = (cf. [#2.4.3.])
| 'VAEX_ELNO'
| ♦ NOM_VARI = (cf. [#2.4.3.])
| 'VAEX_NOEU'
| ♦ NOM_VARI = (cf. [#2.4.3.])
| 'VARC_ELGA'
| 'VARI_ELNO'
| 'VARI_NOEU'

# options de calcul des flux hydrauliques (éléments THM)

◇ HYDRAULIQUE = | 'FLHN_ELGA'

# options thermiques

♦ RESULTAT = resu, / [evol_ther]

◇ THERMIQUE= | 'FLUX_ELGA'
| 'FLUX_ELNO'
| 'FLUX_NOEU'
| 'HYDR_NOEU'
| 'SOUR_ELGA'
| 'ETHE_ELEM'

# options acoustiques

♦ RESULTAT = resu, / [acou_harmo]
/ [mode_acou]

◇ ACOUSTIQUE = | 'PRAC_ELNO'
```

```
| 'PRAC_NOEU'  
| 'PRME_ELNO'  
| 'INTE_ELNO'  
| 'INTE_NOEU'
```

## # options pour les forces et les réactions nodales généralisées

```
◆ RESULTAT = resu,
```

```
◇ FORCE = | 'FORC_NODA'  
| 'REAC_NODA'
```

## # calcul d'un champ utilisateur

```
◇ CHAM_UTIL = _F(  
    ◆ NOM_CHAM = ncham,  
    ◆ / CRITERE = | 'VMIS',  
    | 'INVA_2',  
    | 'TRACE',  
    / FORMULE = l_form, [formule]  
    ◆ NUME_CHAM_RESU = nume, [I]  
),  
◇ TITRE = titre, [l_Kn]  
◇ INFO = / 1, [DEFAULT]  
/ 2,  
)
```

## 2.1 Opérandes RESULTAT/MODELE/CHAM\_MATER/CARA\_ELEM/EXCIT

### 2.1.1 Opérandes RESULTAT

◆ RESULTAT = resu

Nom de la structure de données résultat à enrichir. Cet argument peut être le même que celui utilisé pour le concept enrichi par l'opérateur, ou un nom différent, ce qui créera une nouvelle structure de données résultat.

#### Remarque :

Dans la majorité des situations, la structure de données *resu* contient toutes les informations nécessaires au calcul des options : le modèle, le champ de matériau, les caractéristiques élémentaires, les chargements. Les mots-clés *MODELE* , *CHAM\_MATER* , *CARA\_ELEM* et *EXCIT* sont donc inutiles.

### 2.1.2 Opérandes MODELE / CHAM\_MATER / CARA\_ELEM.

◇ MODELE = mo

Nom du modèle sur lequel sont calculés les efforts, les contraintes, les déformations, etc. Il est optionnel car il peut être extrait du résultat.

◇ CHAM\_MATER = chmater

Champ de matériau associé au modèle *mo*. Ce mot-clé est optionnel et ne doit être fourni que dans des cas exceptionnels (modification volontaire du matériau par exemple).

◇ CARA\_ELEM = caract

Caractéristiques élémentaires associées au modèle *mo* s'il contient des éléments de structure ou si les éléments iso-paramétriques sont affectés par un repère local d'anisotropie. Ce mot-clé est optionnel car il peut être extrait du résultat.

### 2.1.3 Mot clé EXCIT

Ce mot clé facteur (optionnel) permet de spécifier les chargements thermiques ou mécaniques à utiliser pour le calcul des options, en lieu et place de ceux qui ont servi dans le calcul de la structure de données spécifiée sous le mot clé RESULTAT.

La définition de ce mot-clé est identique à celle des commandes qui ont construit la structure de données *resu* : voir les commandes *MECA\_STATIQUE* [U4.51.01], *STAT\_NON\_LINE* [U4.51.03], *DYNA\_LINE\_HARM* [U4.53.11], et *DYNA\_LINE\_TRAN* [U4.53.02].

## 2.2 Sélection des mailles concernées par le calcul

Les mots clés *TOUT*, *GROUP\_MA* et *MAILLE* permettent à l'utilisateur de choisir les mailles sur lesquelles il souhaite faire ses calculs élémentaires de post-traitement.

```
/ TOUT = 'OUI'
```

Toutes les mailles (porteuses d'éléments finis) seront traitées. C'est la valeur par défaut.

```
/ | GROUP_MA = l_grma  
| MAILLE = l_maille
```

Seules les mailles incluses dans *l\_grma* et/ou *l\_maille* seront traitées.

## 2.3 Sélection des numéros d'ordre

L'emploi des mots-clés TOUT\_ORDRE, NUM\_ORDRE, INST, FREQ est décrit dans le document [U4.71.00].

## 2.4 Localisation des champs

Dans la suite du document on ne précisera pas explicitement la localisation des champs. En effet, la localisation est donnée dans le nom du champ (et donc de l'option) :

- Champ par élément : \*\_ELEM
- Champ aux points de Gauss par élément : \*\_ELGA
- Champ aux nœuds par élément : \*\_ELNO
- Champ aux nœuds : \*\_NOEU

Les champs sont, pour la plupart, calculés nativement aux points de Gauss (\*\_ELGA).

Les champs aux nœuds par élément (\*\_ELNO) sont obtenus par extrapolation à partir du champ aux points de Gauss (méthode détaillée dans [R3.06.03]).

Les champs aux nœuds (\*\_NOEU) sont obtenus à partir des champs aux nœuds par élément en faisant une moyenne arithmétique simple (non pondérée par la taille des mailles) des valeurs rencontrées sur les éléments en un nœud donné.

### Remarque 1 :

*Pour le calcul des équivalents, les champs aux nœuds par élément (\*\_ELNO) ne sont pas obtenus par extrapolation à partir du champ aux points de Gauss. L'extrapolation est faite sur le champ de contraintes ou de déformation puis on calcule le champ d'équivalent.*

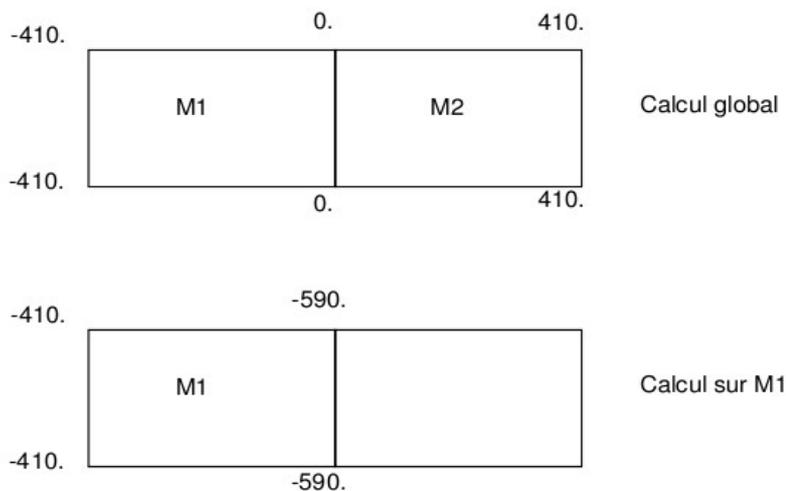
### Remarque 2 :

*Les moyennes aux nœuds de champs calculés dans des repères locaux ne sont licites que si les angles entre ces repères sont faibles. Dans le cas contraire, elles n'ont pas de sens.*

### Remarque 3 :

*Quand les mot-clés GROUP\_MA ou MAILLE sont renseignés pour le calcul d'une option \*\_NOEU, la moyenne arithmétique est faite sur les mailles sélectionnées. Ainsi ce résultat est différent de celui obtenu en faisant un calcul global puis restreint aux seules mailles sélectionnées.*

*Exemple : On considère une structure dont la contrainte de cisaillement  $\sigma_{xy}$  vaut :*



*Dans le calcul global,  $\sigma_{xy}$  est nulle sur  $M1 \cap M2$  comme moyenne de deux valeurs opposées. Ces valeurs sont loin d'être nulles, comme le montre le calcul sur  $M1$  seul. Les valeurs sur la frontière du domaine demandé sont donc à interpréter avec précaution.*

Pour les éléments de structures qui possèdent des sous-points (plaques, coques, poutres multi-fibres, tuyaux), les champs de type \*\_ELGA et \*\_ELNO sont calculés sur tous les sous-points. Pour obtenir un champ sur un seul sous-point (une couche et un niveau par exemple), il faut faire une extraction via l'opérateur POST\_CHAMP (options EXTR\_COQUE, EXTR\_PMF et EXTR TUYAU). D'ailleurs cette opération intermédiaire est indispensable pour calculer un champ de type \*\_NOEU pour ces éléments de structure : les champs de type \*\_NOEU n'ont en effet jamais de sous-point.

Enfin les options de calcul d'énergie ne produisent jamais de champs à sous-point. En effet pour les éléments de structure, le champ est intégré dans l'épaisseur (intégration faite sur les sous-points).

## 2.5 Dépendance des champs

Le calcul d'un champ peut nécessiter le calcul préalable d'un ou plusieurs autres champs. Ainsi par exemple pour calculer un champ \*\_NOEU il est nécessaire de disposer du même champ par élément aux nœuds \*\_ELNO et aux points de Gauss \*\_ELGA.

Cette dépendance est résolue par l'opérateur CALC\_CHAMP qui réalise automatiquement le calcul des champs intermédiaires. Il n'est donc pas nécessaire pour l'utilisateur de connaître l'arbre de dépendance des options. Seuls les champs explicitement demandés par l'utilisateur sont sauvegardés dans la structure de données résultat.

## 2.6 Opérandes pour les options mécaniques

### 2.6.1 Options de calcul des contraintes (Opérande CONTRAINTE)

Les composantes des champs de contraintes et efforts généralisés sont détaillées dans le document [U2.01.05].

```
| 'EFGE_ELGA '  
| 'EFGE_ELNO '  
| 'EFGE_NOEU '
```

Calcul des efforts généralisés (éléments de structure).

Il s'agit soit d'une extraction des efforts contenus dans le champ SIEF\_ELGA/STRX\_ELGA (cas des éléments de poutres/tuyaux ou des discrets), soit d'un calcul par intégration des contraintes (cas des éléments de poutres multi-fibres ou de plaques et coques).

#### Remarque 1 :

*Le champ EFGE\_ELNO n'est pas toujours une extrapolation du champ EFGE\_ELGA ; notamment pour un calcul linéaire où ce champ est calculé directement à partir du déplacement. C'est pourquoi certaines composantes ne sont pas calculées (mises à zéro) en non-linéaire.*

#### Remarque 2 :

*Pour les plaques excentrées, les efforts sont calculés dans le « plan » du maillage. Si on souhaite ces efforts dans le « plan » moyen de la plaque, il faut utiliser la commande POST\_CHAMP/COQUE\_EXCENT.*

```
| 'SIEF_ELGA '  
| 'SIEF_ELNO '  
| 'SIEF_NOEU '
```

Calcul de l'état de contrainte (contraintes ou efforts généralisés selon la modélisation) à partir des déplacements (élasticité linéaire), voir [U2.01.05].

#### Remarque :

Le champ 'SIEF\_ELGA' est calculé nativement par les opérateurs de résolution non-linéaires. Il est toujours présent dans une structure de données résultat de type evol\_noli.

```
| 'SIGM_ELGA'  
| 'SIGM_ELNO'  
| 'SIGM_NOEU'
```

Calcul de l'état de contrainte.

Il s'agit en réalité d'une extraction des contraintes contenues dans le champ SIEF\_ELGA, voir [U2.01.05].

```
| 'SIPO_ELNO'  
| 'SIPO_NOEU'
```

Calcul des contraintes dans la section de poutre décomposée en contributions de chaque effort généralisé.

Liste des composantes du champ :

SN	Contribution de l'effort normal $N$ à $\sigma_{xx}$ , $\sigma_{xx} = \frac{N}{A}$
SMFY	Contribution du moment de flexion $MFY$ à $\sigma_{xx}$ , $\sigma_{xx} = z \frac{MFY}{I_y}$
SMFZ	Contribution du moment de flexion $MFZ$ à $\sigma_{xx}$ , $\sigma_{xx} = -y \frac{MFZ}{I_z}$
SVY	Contribution de l'effort tranchant $VY$ à $\sigma_{xy}$ , $\sigma_{xy} = \frac{VY a_y}{A}$ $a_y$ coefficient de cisaillement dans la direction $y$
SVZ	Contribution de l'effort tranchant $VZ$ à $\sigma_{xz}$ , $\sigma_{xz} = \frac{VZ a_z}{A}$ $a_z$ coefficient de cisaillement dans la direction $z$
SMT	Contribution du moment de torsion $MX$ à $\sigma_{yz}$ , $\sigma_{yz} = \frac{MX R_T}{J_x}$

Les contraintes ci-dessus s'expriment dans le repère local, c'est-à-dire le repère principal d'inertie de la section droite [R3.08.01].

Les valeurs de  $\sigma_{xx}$  dues aux deux moments de flexion sont les valeurs maximales de celles calculées en  $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$  d'une part, et en  $Z_{min}$ ,  $Z_{max}$  d'autre part (sauf pour une section générale où c'est l'utilisateur qui fournit la localisation de l'extremum avec les mot-clés  $RY$ ,  $RZ$  et  $RT$  cf. AFFE\_CARA\_ELEM [U4.42.01]).

Pour une section rectangulaire :

- on calcule la valeur de SMFY en  $z = HZ/2$ ,
- on calcule la valeur de SMFZ en  $y = HY/2$ .

Pour une section circulaire, on calcule les valeurs de SMFY et SMFZ pour  $y$  et  $z$  valant  $R$ .

```
| 'SIPM_ELNO'
```

Calcul des contraintes maximum et minimum dans la section de poutre à partir des efforts généralisés (élasticité linéaire).

La même remarque que pour SIPO\_ELNO s'applique dans le cas d'une section générale.

| 'SIRO\_ELEM'

Calcul des contraintes projetées sur la peau d'un volume (par exemple sur les parements d'un ouvrage hydraulique).

Liste des composantes du champ :

SIG_NX SIG_NY SIG_NZ	Composantes $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ dans le repère global de $\vec{\sigma}_n$
SIG_N	Valeur $SIG_N$
SIG_TX SIG_TY SIG_TZ	Composantes $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ dans le repère global de $\vec{\sigma}_t$
SIG_T1X SIG_T1Y SIG_T1Z	Composantes $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ dans le repère global de $\vec{\sigma}_{t1}$
SIG_T1	Valeur propre $SIG_{T1}$
SIG_T2X SIG_T2Y SIG_T2Z	Composantes $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ dans le repère global de $\vec{\sigma}_{t2}$
SIG_T2	Valeur propre $SIG_{T2}$

Ces champs sont évalués à partir d'un champ de contraintes calculés sur les mailles volumiques (MODELISATION='3D' ou '3D\_SI') :

- Identification des mailles volumiques correspondant aux facettes du groupe de mailles surfaciques ;
- Récupération des contraintes 3D pour les affecter aux nœuds des faces ;
- Moyenne de chacune des composantes du tenseur des contraintes au centre des faces d'éléments ;
- On se place dans un repère composé par le vecteur normal  $\vec{n}$  à la facette et le plan de la facette. On obtient un tenseur noté  $[\sigma]$ .
- On évalue  $[\sigma]\vec{n} = \vec{\sigma}_n + \vec{\sigma}_t$ ,  $\vec{\sigma}_n$  étant un vecteur colinéaire à  $\vec{n}$ .  $\vec{\sigma}_t$  est alors un vecteur représentant le cisaillement qui est négligeable dans le cas des parements amont/aval d'un barrage. On note  $\vec{\sigma}_n = SIG_N \vec{n}$  et  $SIG_N$  indique la présence de traction s'il est positif et de la compression s'il est négatif.
- On se place dans l'hypothèse d'un cisaillement négligeable donc  $[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{2D} & 0 \\ 0 & SIG_N \end{bmatrix}$

On cherche les vecteurs de contraintes principales correspondant à  $\sigma_{2D}$  : on obtient donc les vecteurs  $\vec{\sigma}_{t1}$  et  $\vec{\sigma}_{t2}$  qui sont dans le plan de la facette et les valeurs propres  $SIG_{T1}$  et  $SIG_{T2}$

#### Remarque 1 :

Dans le cas de facettes plongées dans le volume, on choisit la maille volumique qui se trouve du côté « - » par rapport à la normale de la facette. L'utilisateur a la possibilité grâce à la commande MODI\_MAILLAGE / ORIE\_PEAU\_3D / GROUP\_MA\_VOLU de réorienter cette normale comme il le souhaite. Cette convention correspond à ce qui est fait sur les parements extérieurs du barrage si la normale aux facettes est « sortante ».

#### Remarque 2 :

Si l'on renseigne TOUT='OUI', la liste des mailles est filtrée pour ne garder que les mailles peau.

## 2.6.2 Options de calcul des déformations (Opérande DEFORMATION)

Les composantes des champs de déformation sont détaillées dans le document [U2.01.05].

| 'DEGE\_ELGA'  
| 'DEGE\_ELNO'  
| 'DEGE\_NOEU'

Calcul des déformations généralisées à partir des déplacements. Cette option n'a de sens que pour les éléments de structure (poutre, plaque, tuyau).  
Les déformations généralisées sont obtenues dans le repère local de l'élément.

| 'EPFD\_ELGA'  
| 'EPFD\_ELNO'  
| 'EPFD\_NOEU'

Calcul des déformations de fluage de dessiccation, pour les modèles BETON\_UMLV\_FP et BETON\_BURGER\_FP.

| 'EPFP\_ELGA'  
| 'EPFP\_ELNO'  
| 'EPFP\_NOEU'

Calcul des déformations de fluage propre associées au modèle GRANGER\_FP, au modèle BETON\_UMLV\_FP ou au modèle BETON\_BURGER\_FP.

| 'EPME\_ELGA'  
| 'EPME\_ELNO'  
| 'EPME\_NOEU'

Calcul des déformations « mécaniques » à partir des déplacements. Ce calcul est fait en théorie des « **petits déplacements** ». Les déformations calculées sont égales aux déformations totales moins les déformations thermiques.

$$\varepsilon_{ij}^m(u) = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) - \varepsilon^{th}$$

| 'EPMG\_ELGA'  
| 'EPMG\_ELNO'  
| 'EPMG\_NOEU'

Calcul des déformations « mécaniques » à partir des déplacements. Ce calcul est fait en théorie des « **grands déplacements** ». Les déformations calculées sont égales aux déformations totales moins les déformations thermiques.

$$E_{ij}^m(u) = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}) - \varepsilon^{th}$$

| 'EPSG\_ELGA'  
| 'EPSG\_ELNO'  
| 'EPSG\_NOEU'

Calcul des déformations de Green-Lagrange.

$$E_{ij}(u) = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j})$$

| 'EPSI\_ELGA'  
| 'EPSI\_ELNO'  
| 'EPSI\_NOEU'

Calcul des déformations à partir des déplacements.

$$\varepsilon_{ij}(u) = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

Pour les éléments de structure, ces déformations sont obtenues dans le repère local de l'élément.

| 'EPSP\_ELGA'  
| 'EPSP\_ELNO'  
| 'EPSP\_NOEU'

Calcul des déformations anélastiques à partir du champ de déplacement  $u$ , des contraintes  $\sigma$ , de la température  $T$ , des déformations anélastiques éventuelles  $\varepsilon^a$ , et des variables internes,

$$\varepsilon^p = \varepsilon(u) - A^{-1} \sigma - \varepsilon^{th}(T) - \varepsilon^a - \varepsilon^fl$$

où  $\varepsilon^fl$  est la déformation de fluage propre de Granger.

| 'EPVC\_ELGA'  
| 'EPVC\_ELNO'  
| 'EPVC\_NOEU'

Calcul des déformations liées aux variables de commande. Pour l'instant seules les composantes suivantes sont définies :

- les déformations thermiques : EP THER \_ L, EP THER \_ T, EP THER \_ N telles que :  $\varepsilon_i^{th} = \alpha_i (T - T_{ref})$ ;  $i \in \{L, T, N\}$  (si le matériau est isotrope, les 3 composantes sont égales),  $T$  étant la température et  $\alpha_i$  le coefficient de dilatation thermique ;
- le retrait de séchage EPSECH (utilisé pour les lois décrivant le comportement du béton)  $\varepsilon^{sech} = -K_{dessic} (S_{ref} - S)$ ,  $S$  étant la variable de commande séchage et  $K_{dessic}$  le coefficient de retrait de dessiccation ;
- le retrait d'hydratation EPHYDR (utilisé pour les lois décrivant le comportement du béton)  $\varepsilon^{hydr} = -B_{endog} h$ ,  $h$  étant la variable de commande hydratation, et  $B_{endog}$  étant le coefficient de retrait endogène.
- La déformation liée à la pression de fluide (pour la thermo-hydro-mécanique avec une résolution par chaînage) : EPPTOT telle que :  $\varepsilon^{ptot} = \frac{b}{3K} p_{tot}$ ,  $p_{tot}$  est la variable de commande pression totale de fluide,  $b$  est le coefficient de Biot,  $K$  est le module d'élasticité.

## 2.6.3 Options d'extraction des variables internes (Opérande VARI\_INTERNE)

| 'VAEX\_ELGA'  
| 'VAEX\_ELNO'  
| 'VAEX\_NOEU'

Extraction des **variables internes en THM uniquement**.

Le but de cette option est de pouvoir post-traiter les variables internes en THM de façon plus conviviale. Le principe de ces champs est d'extraire du champ VARI\_ELGA (ou VARI\_ELNO) la (une et une seule) variable interne qui nous intéresse via un mot-clé sans devoir connaître son nom dans le champ VARI\_\*.

Liste des composantes possibles du champ (le champ n'a qu'une seule composante, celle choisie par l'utilisateur via NOM\_VARI) :

DPORO	Variation de la porosité du matériau
DRHOLQ	Variation de la masse volumique du matériau
DPVP	Variation de la pression de vapeur
SATLIQ	Saturation du liquide
EVP	Déformation plastique volumique cumulée
IND_ETA	Indicateur d'état mécanique
D	Valeur de l'endommagement
IND_END	Indicateur d'endommagement
TEMP_MAX	Température maximale
GAMP	Déformation déviatoire plastique cumulée

PCR	Pression critique
SEUIL HYD	Seuil hydrique
IND HYD	Indicateur d'irréversibilité hydrique
PCOHE	Pression de cohésion
COMP ROC	Comportement de la roche
SEUIL ISO	Seuil isotrope
ANG DEV	Angle du seuil déviatoire
X11	Composantes du tenseur d'érouissage cinématique
X22	Composantes du tenseur d'érouissage cinématique
X33	Composantes du tenseur d'érouissage cinématique
X12	Composantes du tenseur d'érouissage cinématique
X13	Composantes du tenseur d'érouissage cinématique
X23	Composantes du tenseur d'érouissage cinématique
DIST DEV	Distance normalisée au seuil déviatoire
DEV SUR CRIT	Rapport entre le seuil déviatoire et le seuil déviatorique critique
DIST ISO	Distance normalisée au seuil isotrope
NB ITER	Nombre d'itérations internes
ARRET	Valeur du test local d'arrêt du processus itératif
NB REDE	Nombre de redécoupage local du pas de temps
SIGNE	Signe du produit contracté de la contrainte déviatorique par la déformation plastique déviatorique

◇ NOM\_VARI = / nom\_vari, [TXM]  
Nom de la variable interne.

### Remarque 1 :

Lorsque la variable à extraire ne fait pas partie des variables internes des lois concernées, une alarme est émise mais le champ est tout de même affecté à  $R8VIDE()$  (nombre réel très grand de l'ordre de  $1.0E+308$ ).

### Remarque 2 :

Le champ  $VAEX\_NOEU$  est calculé à partir de  $VAEX\_ELNO$  et non pas par extraction du champ  $VARI\_NOEU$ .

| 'VARC\_ELGA'

Calcul des variables de commandes ayant servi à un calcul mécanique.

Liste des composantes du champ :

TEMP	Cf. documentation de la commande $AFPE\_MATERIAU$ [U4.43.03] pour la définition de chacune des composantes.
HYDR	
SECH	
CORR	
IRRA	
PTOT	
DIVU	
NEUT1	
NEUT2	

### Remarque :

Toutes les composantes sont systématiquement calculées. Les variables qui n'ont pas été définies sont initialisées à la valeur  $R8VIDE()$  (nombre réel très grand de l'ordre de  $1.0E+308$ ).

| 'VARI\_ELNO'

| 'VARI\_NOEU'

Calcul des variables internes.

Liste des composantes du champ :

V1	Variable interne 1
...	
Vi	Variable interne i
...	
Vn	Variable interne n

Le nombre et le type de ces variables internes sont spécifiques à chaque modèle de comportement (cf. [U4.51.11]).

**Remarque :**

Le champ 'VARI\_ELGA' est calculé nativement par les opérateurs de résolution non-linéaires. Il est toujours présent dans une SD résultat de type *evol\_noli*.

## 2.6.4 Options de calcul d'énergie (Opérande ENERGIE)

| 'DISS\_ELEM'

Calcul de l'énergie dissipée par l'endommagement. Le champ obtenu possède une seule composante de nom 'ENDO'.

Liste des composantes du champ :

ENDO	Énergie dissipée par l'endommagement
------	--------------------------------------

**Remarque :**

Valable uniquement pour les éléments *DKTG* et la loi *GLRC\_DM*. Son expression est donnée dans [R7.01.32].

| 'DISS\_ELGA'

| 'DISS\_ELNO'

| 'DISS\_NOEU'

Calcul de la densité d'énergie dissipée par l'endommagement. Le champ obtenu possède une seule composante de nom 'ENDO'.

Liste des composantes du champ :

ENDO	Énergie dissipée par l'endommagement
------	--------------------------------------

**Remarque :**

Valable uniquement pour les éléments *DKTG* et la loi *GLRC\_DM*. Son expression est donnée dans [R7.01.32].

| 'ECIN\_ELEM'

Calcul de l'énergie cinétique.

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

Liste des composantes du champ :

TOTALE	Énergie cinétique
Composantes supplémentaires pour les plaques et coques :	
MEMBRANE FLEXION	Contributions à l'énergie cinétique (cf. [R3.07.03])
Composantes supplémentaires pour les poutres courbes :	
PLAN_XY PLAN_XZ	Contributions à l'énergie cinétique (cf. [R3.08.01])
Composantes supplémentaires pour les discrets :	
DX DY DZ DRX DRY DRZ	Contributions à l'énergie cinétique

| 'ENEL\_ELEM'

Calcul de l'énergie élastique.

$$E_p = \frac{1}{2} \sigma A^{-1} \sigma$$

Liste des composantes du champ :

TOTALE	Énergie élastique
Composantes supplémentaires pour les plaques et coques :	
Contributions à l'énergie élastique (cf. [R3.07.03])	
MEMBRANE FLEXION CISAILLE COUPL_MF	Énergie élastique en membrane Énergie élastique en flexion Énergie élastique en cisaillement Énergie élastique de couplage membrane-flexion

**Remarque :**

| *En non-linéaire (STAT\_NON\_LINE, DYNA\_NON\_LINE,...) les composantes CISAILLE et COUPL\_MF sont nulles.*

| 'ENEL\_ELGA'

| 'ENEL\_ELNO'

| 'ENEL\_NOEU'

Calcul de la densité d'énergie élastique.

Liste des composantes du champ :

TOTALE	Énergie élastique
Composantes supplémentaires pour les plaques et coques :	
Contributions à l'énergie élastique (cf. [R3.07.03])	
MEMBRANE FLEXION CISAILLE COUPL_MF	Énergie élastique en membrane Énergie élastique en flexion Énergie élastique en cisaillement Énergie élastique de couplage membrane-flexion

**Remarque :**

| *En non-linéaire (STAT\_NON\_LINE, DYNA\_NON\_LINE,...) les composantes CISAILLE et COUPL\_MF sont nulles.*

| 'EPOT\_ELEM'

Calcul de l'énergie potentielle de déformation, à partir du champ de déplacement  $u$  et du champs de température  $T$  :

Liste des composantes du champ :

TOTALE	Énergie potentielle
Composantes supplémentaires pour les plaques et coques :	
MEMBRANE FLEXION	Contributions à l'énergie potentielle (cf. [R3.07.03])
Composantes supplémentaires pour les poutres droites :	
TRAC_COM TORSION FLEX_Y FLEX_Z	Contributions à l'énergie potentielle (cf. [R3.08.01])
Composantes supplémentaires pour les poutres courbes :	
PLAN_XY PLAN_XZ	Contributions à l'énergie potentielle (cf. [R3.08.01])
Composantes supplémentaires pour les discrets :	
DX DY DZ DRX DRY DRZ	Contributions à l'énergie potentielle

- pour les éléments de milieux continus 2D et 3D :

$$E_{pot} = \frac{1}{2} \int_{element} \epsilon(u) A \epsilon(u) dv - \int_{element} \epsilon(u) A \epsilon^h(u) dv + \frac{1}{2} \int_{element} \epsilon^h(u) A \epsilon^h(u) dv$$

- pour les éléments de poutres :

$$E_{pot} = \frac{1}{2} u^T K_e u - u^T B^T A \epsilon^h + \frac{1}{2} \epsilon^h A \epsilon^h$$

- pour les éléments de plaques et coques :

$$E_{pot} = \frac{1}{2} u^T K_e u - u^T B^T A \epsilon^h$$

| 'ETOT\_ELEM '

Calcul de l'incrément d'énergie de déformation totale entre l'instant courant et l'instant précédent.

Liste des composantes du champ :

TOTALE	Incrément d'énergie de déformation totale
--------	---

| 'ETOT\_ELGA '  
| 'ETOT\_ELNO '  
| 'ETOT\_NOEU '

Calcul de l'incrément de densité d'énergie de déformation totale entre l'instant courant et l'instant précédent.

Liste des composantes du champ :

TOTALE      Incrément d'énergie de déformation totale

## 2.6.5 Options de calcul de critères (Opérande CRITERES)

| 'DERA\_ELGA '  
| 'DERA\_ELNO '  
| 'DERA\_NOEU '

Calcul de l'indicateur local de décharge et indicateur de perte de radialité [R4.20.01].

Liste des composantes du champ :

DCHA_V	Indicateur de décharge calculé sur le tenseur déviateur des contraintes
DCHA_T	Indicateur de décharge calculé sur le tenseur total des contraintes
IND_DCHA	Indicateur permettant de savoir si la décharge resterait élastique ou s'il y aurait un risque de plastification si on utilisait un écrouissage cinématique pur
VAL_DCHA	Indique la proportion de sortie du critère dans le cas de décharge abusive
X11 X22 X33 X12 X13 X23	Composantes du tenseur cinématique utilisées pour le calcul de IND_DCHA
RADI_V	Indicateur de la variation de la direction des contraintes entre les instants $t$ et $t + \Delta t$
ERR_RADI	Erreur $\eta$ due à la discrétisation en temps, directement reliée à la rotation de la normale à la surface de charge

DCHA\_V et DCHA\_T expriment, dans les deux cas, la variation relative de la norme des contraintes au sens de Von Mises :  $I_1 = \frac{\|\sigma(M, t + \Delta t)\| - \|\sigma(M, t)\|}{\|\sigma(M, t + \Delta t)\|}$ , la norme étant fonction du comportement (écrouissage isotrope ou cinématique linéaire)

IND\_DCHA peut prendre les valeurs suivantes :

- 0 : valeur initiale sans contrainte ;
- 1 : si charge élastique ;
- 2 : si charge plastique ;
- -1 : si décharge élastique licite (quel que soit le type d'écrouissage) ;
- -2 : si décharge abusive (on aurait plastifié avec un écrouissage cinématique).

RADI\_V est donné par la relation suivante :

$$I_2 = 1 - \frac{|\sigma(M, t) \cdot \Delta \sigma|}{\|\sigma(M, t)\| \|\Delta \sigma\|}$$

Cette quantité est nulle lorsque la radialité est conservée durant l'incrément de temps.

ERR\_RADI est l'angle entre  $n^-$ , la normale au critère de plasticité au début du pas de temps (instant  $t^-$ ), et  $n^+$ , la normale au critère de plasticité calculée à la fin du pas de temps (instant  $t^+$ ) de la façon suivante :

$$\eta = \frac{1}{2} \|\Delta n\| = \frac{1}{2} \|n^+ - n^-\| = \left| \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right|$$

Cela fournit une mesure de l'erreur (également utilisée pour raffiner le pas de temps [U4.51.11]). Ce critère est opérationnel pour les comportements élastoplastiques de Von Mises à écrouissage isotrope, cinématique linéaire et mixte : VMIS\_ISOT\_LINE, VMIS\_ISOT\_TRAC, VMIS\_ISOT\_PUIS, VMIS\_CINE\_LINE, VMIS\_ECMI\_LINE, VMIS\_ECMI\_TRAC, et pour les comportements élasto-visco-plastiques de Chaboche : VMIS\_CIN1\_CHAB, VMIS\_CIN2\_CHAB, VMIS\_CIN2\_MEMO, VISC\_CIN1\_CHAB, VISC\_CIN2\_CHAB, VISC\_CIN2\_MEMO.

**Remarque :**

Le calcul de ces options nécessite de comparer les champs de contraintes aux instants  $t_i$  et  $t_{i+1}$ . Le résultat est rangé au numéro d'ordre associé à l'instant  $t_i$ .

L'indicateur de décharge est calculé par :  $ID = \frac{\|\sigma_{i+1}\| - \|\sigma_i\|}{\|\sigma_{i+1}\|}$ .

Par défaut, le calcul se fait pour les numéros d'ordre 1 à  $n-1$ . Mais si on précise la liste d'instant (avec des "trous" éventuellement), le calcul ne concernera que les instants demandés mais il comparera toujours l'instant  $t_i$  avec l'instant  $t_{i+1}$  dans la liste des instants ayant servi à faire le calcul non-linéaire.

| 'ENDO\_ELGA'  
| 'ENDO\_ELNO'  
| 'ENDO\_NOEU'

Calcul du dommage  $d$  à partir du tenseur des contraintes et de la déformation plastique cumulée  $p$ .

Liste des composantes du champ :

TRIAx	Taux de triaxialité
SI_ENDO	Contrainte équivalente d'endommagement de Lemaître-Sermage
COENDO	Contrainte d'endommagement de Lemaître-Sermage normalisée
DOM_LEM	Dommage de Lemaître-Sermage

Le taux de triaxialité  $\alpha$  est donné par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}}$$

et la contrainte équivalente d'endommagement  $\sigma^*$  :

$$\sigma^* = \sigma_{eq} \sqrt{\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu)\alpha^2}$$

$$s = \sigma - \frac{1}{3} tr(\sigma) \cdot I$$

avec :  $\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s : s}$

$$\sigma_h = \frac{1}{3} tr(\sigma)$$

La cinétique d'endommagement est donnée par la loi de Lemaître-Sermage :

$$\dot{d} = \left[ \frac{Y}{S} \right]^s \dot{p} \text{ si } p \geq p_{seuil} \text{ avec } Y = \frac{\sigma^{*2}}{2E(1-D)^2}$$

où  $S$  et  $s$  sont des coefficients caractéristiques du matériau et  $p_{seuil}$  le seuil d'endommagement lié à l'énergie stockée dans le matériau (si  $s=1$  on obtient la loi de Lemaître classique).

| 'EPEQ\_ELGA'  
| 'EPEQ\_ELNO'  
| 'EPEQ\_NOEU'  
| 'EPMQ\_ELGA'  
| 'EPMQ\_ELNO'  
| 'EPMQ\_NOEU'

Calcul de la déformations équivalentes calculées à partir des champs EPSI\_\*, ou EPME\_\*).

Liste des composantes du champ :

INVA_2	Déformation équivalente de Von Mises
PRIN_1 PRIN_2 PRIN_3	Déformations principales, rangées dans l'ordre croissant
INVA_2SG	Déformation équivalente de Von Mises signée par la trace de $\varepsilon$
VECT_1_X VECT_1_Y VECT_1_Z VECT_2_X VECT_2_Y VECT_2_Z VECT_3_X VECT_3_Y VECT_3_Z	Directions principales

La déformation équivalente de Von Mises est donnée par l'expression suivante :

$$INVA\_2 = \sqrt{\frac{2}{3} dev(\varepsilon)_{ij} dev(\varepsilon)_{ji}} \text{ avec } dev(\varepsilon)_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} tr(\varepsilon) \delta_{ij}$$

**Remarque :**

On note que les déformations équivalentes obtenues à partir de  $EPSI\_*$  et  $EPME\_*$  sont identiques. En effet, la différence entre les deux tenseurs est un tenseur sphérique (déformation thermique). Comme la déformation équivalente est obtenue à partir du second invariant du déviateur, le tenseur sphérique « disparaît » lorsque l'on prend le déviateur.

| 'INDL\_ELGA'

Calcul de l'indicateur de localisation, basé sur le tenseur acoustique (critère de RICE).

Liste des composantes du champ :

	Indicateur de localisation
INDICE	0 si $det(N.H.N) > 0$ 1 sinon, ce qui correspond à l'initiation de la localisation
DIR1	Première normale à la zone de localisation
DIR2	Deuxième normale à la zone de localisation
DIR3	Troisième normale à la zone de localisation
DIR4	Quatrième normale à la zone de localisation

Cet indicateur définit un état à partir duquel le problème local d'intégration du comportement perd son caractère d'unicité. Il est défini par :  $det(N.H.N) \leq 0$ , où  $H$  désigne l'opérateur tangent et  $N$  la normale aux directions de localisation.

**Remarque :**

La méthode n'est développée que dans le cas 2D et pour les lois de comportement de type  $DRUCK\_PRAGER$  et  $HUJEUX$ .

| 'PDIL\_ELGA'

Calcul du module de rigidité de micro-dilatation.

Liste des composantes du champ :

A1_LC2	Module de rigidité de micro-dilatation
--------	--

L'option PDIL\_ELGA fournit dans le cadre des milieux de second gradient de dilatation la valeur du module A1\_LC2, permettant de maîtriser la périodicité de la solution non triviale du problème initialement homogène [R5.04.03].

Le calcul de A1\_LC2 est obtenu via l'évaluation d'une fonction dépendant de l'orientation géométrique de la bande matérielle considérée. La discrétisation angulaire imposée actuellement est égale à  $0.1^\circ$ .

**Remarque :**

*La méthode n'est développée que pour les lois de comportement de type DRUCK\_PRAGER et HUJEUX.*

| 'SIEQ\_ELGA'  
| 'SIEQ\_ELNO'  
| 'SIEQ\_NOEU'

Calcule des contraintes équivalentes calculées à partir des champs de contrainte.

Liste des composantes du champ :

VMIS	Contrainte équivalente de Von Mises
TRESCA	Contrainte de Tresca
PRIN_1 PRIN_2 PRIN_3	Contraintes principales, rangées dans l'ordre croissant
VMIS_SG	Contrainte équivalente de Von Mises signée par la trace de $\sigma$
VECT_1_X VECT_1_Y VECT_1_Z VECT_2_X VECT_2_Y VECT_2_Z VECT_3_X VECT_3_Y VECT_3_Z	Directions principales
TRSIG	Trace de $\sigma$
TRIAX	Taux de triaxialité

La contrainte équivalente de Von Mises est donnée par l'expression suivante :

$$VMIS = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ji}} \text{ avec } s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} tr(\sigma) \delta_{ij}$$

Le taux de triaxialité est donnée par l'expression suivante :

$$TRIAX = \frac{TRSIG}{VMIS}$$

## 2.6.6 Option de calcul des flux hydrauliques (Opérande HYDRAULIQUE)

| 'FLHN\_ELGA'

Calcul des flux hydrauliques en THM  $\Phi_{ij} = M_{ij} \cdot \nu$  sur les éléments de bord (2D ou 3D) à partir du vecteur flux aux nœuds.

$M_{ij}$  est le vecteur flux hydraulique du composant  $ij$ .

Liste des composantes du champ :

FH11	
FH22	
FH12	
FH21	

## 2.7 Opérandes pour les options thermiques

## 2.7.1 Opérande THERMIQUE

| 'FLUX\_ELGA'  
| 'FLUX\_ELNO'  
| 'FLUX\_NOEU'

Calcul des flux de chaleur à partir de la température.

Liste des composantes du champ :

FLUX FLUY FLUZ	Flux de chaleur dans les trois directions de l'espace (dans le feuillet moyen pour les coques)
Composantes supplémentaires pour les coques :	
FLUX_INF FLUY_INF FLUZ_INF	Flux de chaleur dans les trois directions de l'espace en peau inférieure
FLUX_INF FLUY_INF FLUZ_INF	Flux de chaleur dans les trois directions de l'espace en peau supérieure

| 'HYDR\_NOEU'

Calcul de l'hydratation.

Liste des composantes du champ :

HYDR	Hydratation
------	-------------

### Remarque :

Le champ 'HYDR\_ELNO' est calculé nativement par l'opérateur de thermique non-linéaire THER\_NON\_LINE pour la modélisation du béton [R7.01.12].

| 'SOUR\_ELGA'

Calcul d'une source de chaleur.

Liste des composantes du champ :

SOUR	Source de chaleur
------	-------------------

Cette source est calculée à partir d'un potentiel électrique via la loi d'Ohm. Ce potentiel électrique doit avoir été calculé par l'opérateur THER\_LINEAIRE [U4.54.01] en faisant les analogies nécessaires. Cette source peut être ensuite utilisée dans un calcul thermique via le mot-clé SOUR\_CALCULEE de la commande AFFE\_CHAR\_THER [U4.44.02].

| 'ETHE\_ELEM'

Calcul de l'énergie thermique à l'équilibre à partir du champ de température  $T$ .

Liste des composantes du champ :

TOTALE	Énergie thermique
--------	-------------------

## 2.8 Opérandes pour les options acoustiques

### 2.8.1 Opérande ACOUSTIQUE

| 'INTE\_ELNO'  
| 'INTE\_NOEU'

Calcul de l'intensité acoustique. Les définitions se trouvent dans [R4.02.01].

Liste des composantes du champ :

INTX_R	Intensité acoustique, partie réelle selon l'axe x
INTY_R	Intensité acoustique, partie réelle selon l'axe y
INTZ_R	Intensité acoustique, partie réelle selon l'axe z
INTX_I	Intensité acoustique, partie imaginaire selon l'axe x
INTY_I	Intensité acoustique, partie imaginaire selon l'axe y
INTZ_I	Intensité acoustique, partie imaginaire selon l'axe z

| 'PRAC\_ELNO'  
| 'PRAC\_NOEU'

Calcul de la pression aux nœuds en partie réelle, partie imaginaire et décibels.

Liste des composantes du champ :

PRES_I	Pression acoustique, partie réelle
PRES_R	Pression acoustique, partie imaginaire
DB	Pression acoustique en décibel

| 'PRME\_ELNO'

Calcul de la pression aux nœuds pour les éléments FLUIDE.

Liste des composantes du champ :

DB	Pression acoustique en décibel
----	--------------------------------

## 2.9 Opérande pour les forces et les réactions nodales

### 2.9.1 Opérande FORCE

| 'FORC\_NODA'

Calcul des forces nodales généralisées à partir des contraintes aux points de Gauss.

Liste des composantes du champ :

DX DY DZ	Forces nodales
Composantes supplémentaires pour les éléments de structure :	
DRX DRY DRZ	Forces nodales

Le calcul se fait de la façon suivante :

$$\int_{\Omega} \sigma \varepsilon(\mathbf{u}) d\Omega = \sum_K \int_K \sigma^K \varepsilon(\mathbf{u}_K) dK = \sum_K \int_K \sigma^K \mathbf{B} \mathbf{u}_K dK$$

avec  $\sigma_K$  contraintes aux points de Gauss de l'élément  $K$  ;  
 $\mathbf{B}$  l'opérateur éléments finis de déformations généralisées ;  
 $\mathbf{u}_K$  déplacement élémentaire généralisé.

$$= \sum_K F_K \mathbf{u}_K \text{ avec } F_K = \left\{ \int_K \mathbf{B} \sigma^K dK \right\} \text{ les forces nodales généralisées}$$

où  $B$  est la matrice reliant les déformations du 1<sup>er</sup> ordre aux déplacements.

La dimension des forces nodales est duale de celle des  $\mathbf{u}_K$  pour donner un travail (en Joules).

Pour les éléments de poutre et les éléments discrets, les contraintes aux points de Gauss sont en fait les efforts nodaux généralisés dans le repère de l'élément (obtenus par le produit de la matrice de rigidité de l'élément par le déplacement et en tenant compte des efforts d'origine thermique et des efforts répartis). Le calcul des forces nodales se fait en projetant les efforts nodaux contenus dans le champ de nom symbolique 'SIEF\_ELGA' dans le repère global. La sommation ci-dessus sur les éléments s'applique ensuite. Les composantes DX, DY et DZ donnent les forces et DRX, DRY et DRZ les moments.

Pour les éléments axisymétriques, l'intégration en  $\theta$  se fait sur un secteur de  $1 \text{ radian}$ . Si on veut l'intégrale de l'effort surfacique sur tout le disque il faut donc multiplier par  $2\pi$ .

Pour les éléments en déformation plane, le calcul est fait sur une bande de largeur unité. Les forces nodales calculées sont donc en fait des forces par unité de longueur. Si on veut calculer les forces nodales s'exerçant sur une structure de largeur  $l$ , il faut multiplier le résultat en D\_PLAN par  $l$ , à ceci près que l'hypothèse de déformation plane n'est pas valide près des deux faces. On aura donc un résultat approximatif.

Pour les éléments massifs (3D, 2D et barres), les FORC\_NODA en général ont la dimension d'une force. Il s'agit d'un champ sur les nœuds du maillage où la valeur en un nœud est obtenue à partir des contraintes calculées sur les éléments concourants à ce nœud, ainsi leurs valeurs varient donc lorsque le maillage change. En l'absence de chargement réparti, l'équilibre impose leur nullité en un nœud intérieur, tandis qu'elles correspondent à la réaction sur les appuis où l'on impose une relation cinématique (cas d'un déplacement imposé).

Dans le cas des coques, les composantes DX, DY et DZ donnent les FORC\_NODA (de dimension d'une force) dans le repère global du maillage. Ces composantes sont construites avec les efforts normaux et tranchants dans la coque. Les composantes DRX, DRY et DRZ donnent les FORC\_NODA (de dimension d'un moment) dans le repère global du maillage, construites avec les moments fléchissants dans la coque.

En hydraulique, les forces nodales généralisées associées à chaque composante correspondent à un flux. Si on note  $\mathbf{Q}^T \sigma_0$  le résultat de FORC\_NODA, pour les équations hydrauliques, alors pour un pas de temps  $\Delta t$ , on a :

$$\int_{\Omega} \mathbf{Q}^T \sigma_0 p^* d\Omega = -\Delta t \int_{\Omega} \mathbf{M}^- \nabla p^* d\Omega$$

Dans FORC\_NODA :

- au degré de liberté PRE1 est associé le flux d'eau  $-\Delta t \int_{\Omega} \mathbf{M}_{vp} + \mathbf{M}_w^- \nabla p^* d\Omega$
- au degré de liberté PRE2 est associé le flux du composant gazeux  $-\Delta t \int_{\Omega} \mathbf{M}_{ad} + \mathbf{M}_{as}^- \nabla p^* d\Omega$
- au degré de liberté TEMP est associé le flux thermique  $-\Delta t \int_{\Omega} \mathbf{q}^- \nabla T^* d\Omega$

avec  $\mathbf{q}$  le flux thermique et  $\mathbf{M}_w$ ,  $\mathbf{M}_{vp}$ ,  $\mathbf{M}_{as}$  et  $\mathbf{M}_{ad}$  les flux hydrauliques de l'eau liquide, de la vapeur, de l'air (ou tout autre composant) sec et de l'air dissous dans le liquide. Ces données correspondent aux contraintes généralisées de Code\_Aster  $M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22}$ .

| 'REAC\_NODA'

Calcul des forces nodales de réactions généralisées aux nœuds, à partir des contraintes aux points de Gauss.

Liste des composantes du champ :

DX DY DZ	Forces nodales
Composantes supplémentaires pour les éléments de structure :	
DRX DRY DRZ	Forces nodales

Pour les concepts résultat de type `evol_elas`, `mult_elas`, `fourier_elas` ou `evol_noli`, ce calcul se fait par :

$$\int_{\Omega} \sigma(\varepsilon(\mathbf{u})) \cdot \varepsilon(\mathbf{v}) d\Omega - \mathbf{L}(\mathbf{v})$$

avec  $\mathbf{L}(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{F}_s \cdot \mathbf{v} d\Gamma + \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{v}_i$

où  $\mathbf{f}$  sont les forces volumiques  
 $\mathbf{F}_s$  les forces généralisées surfaciques  
 $\mathbf{F}_i$  les forces ponctuelles au nœud  $i$

Si on note  $\mathbf{R}_K$  le vecteur des réactions nodales sur l'élément  $K$ , on a à partir des forces nodales généralisées :

$$\mathbf{R}_K = \mathbf{F}_K - \int_K \mathbf{f} dK - \int_{\partial K} \mathbf{F} \delta K - \sum_i \mathbf{F}_i$$

autrement dit on retranche aux forces nodales les forces extérieures appliquées à l'élément  $K$ .

À noter que le chargement de température ne figure pas dans les forces extérieures.

En dynamique, pour obtenir les réactions nodales, il convient d'ôter de surcroît les efforts d'inertie (accélération) et d'amortissement (vitesse). Actuellement dans `Code_Aster` les effets de l'amortissement sur les réactions nodales sont négligés.

Pour les concepts résultat de type `mode_meca` (issus de calculs modaux) la formule est :

$$\int_{\Omega} \sigma(\varepsilon(\mathbf{u})) \cdot \varepsilon(\mathbf{v}) d\Omega - \omega^2 \mathbf{M} \mathbf{u}$$

où  $\mathbf{M}$  est la matrice de masse  
 $\omega$  la pulsation propre  
 $\mathbf{u}$  le champ de déplacement

Pour les concepts résultat de type `dyna_trans` issus de calculs dynamiques transitoires linéaires (`DYNA_LINE_TRAN`, ou `DYNA_TRAN_MODAL` par le biais de `REST_GENE_PHYS`), de type `dyna_harmo` issus de calculs harmoniques (`DYNA_LINE_HARM`) ou de type `evol_noli` issus de calcul dynamiques transitoires non-linéaires (`DYNA_NON_LINE`) l'expression est :

$$\int_{\Omega} \sigma(\varepsilon(\mathbf{u})) \cdot \varepsilon(\mathbf{v}) d\Omega + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} - \mathbf{L}(\mathbf{v})$$

où  $\mathbf{M}$  est la matrice de masse ;  
 $\ddot{\mathbf{u}}$  le champ d'accélération ;  
 $\mathbf{L}$  le vecteur des forces extérieures appliquées.

### Remarque 1 :

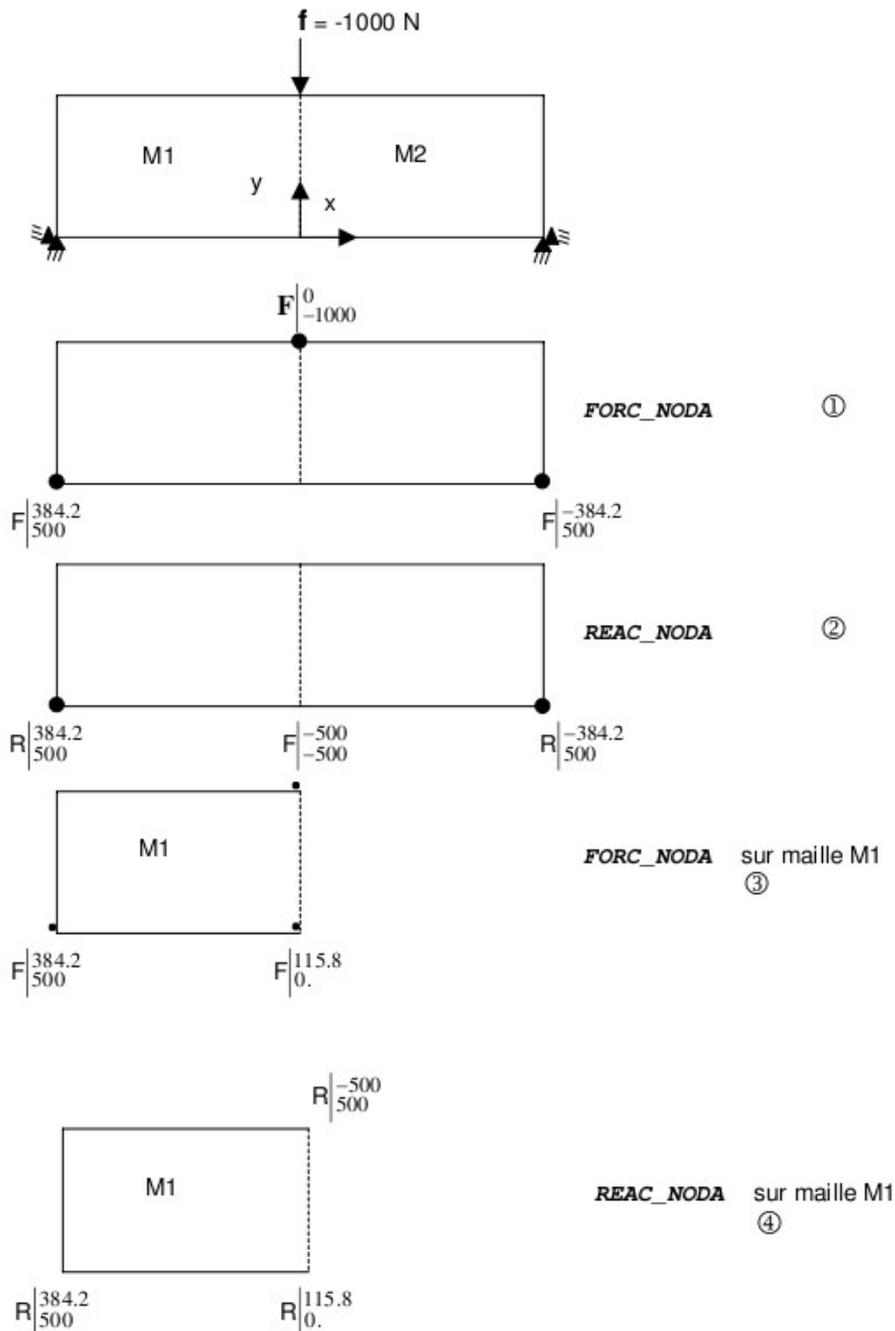
Les réactions nodales sont nulles en tout point intérieur du modèle et ne sont pas nulles a priori en un point du bord soumis à une condition aux limites cinématique (ou à des efforts de contact).  
 Toutefois le fait de négliger l'apport de l'amortissement en dynamique peut créer un léger écart par rapport au résultat exact.

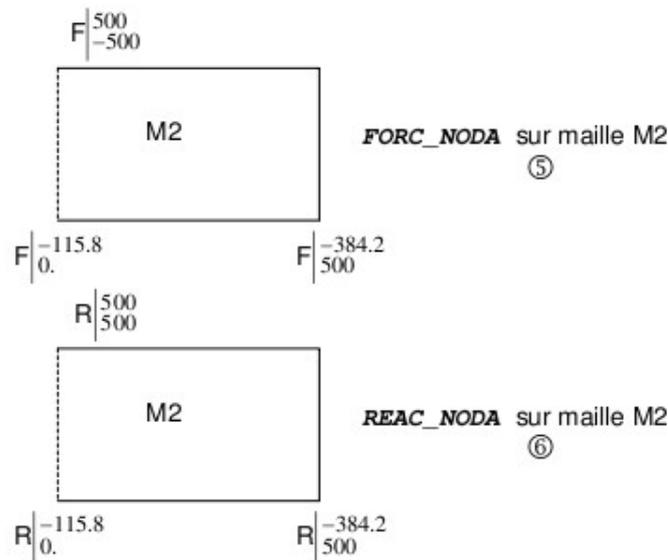
## Remarque 2 :

Si le mot clé `GROUP_MA` est renseigné, les options '`FORC_NODA`' et '`REAC_NODA`' sont calculées ainsi :

$F_K$  est calculé uniquement sur les éléments demandés puis assemblé. Le résultat est différent d'un calcul global sur tout le domaine puis réduit aux éléments demandés. La méthode implantée permet de mesurer la réaction d'un morceau de modèle sur un autre.

## 2.9.2 Exemple 1: structure chargée avec force nodale (2 éléments QUAD4)





Sur cet exemple, les réactions aux nœuds (2) sont bien égales aux forces nodales (1) moins le chargement. Elles représentent les réactions aux appuis de la structure.

Si on restreint le calcul à la maille  $M1$ , les forces (3) aux nœuds appartenant à la frontière entre  $M1$  et  $M2$  sont différentes. Elles représentent la réaction du modèle formé de  $M1$  au modèle formé de  $M2$ . À noter que le chargement nodal est divisé par deux car les deux mailles y contribuent. Les réactions nodales (4) sont encore égales aux forces nodales moins le chargement.

Sur le calcul restreint à la maille  $M2$ , les forces nodales (5) suivant  $OX$  sont de signe contraire au calcul restreint à la maille  $M1$ , illustrant le principe de l'action et la réaction.

## 2.9.3 Exemple 2 : structure avec chargement de température

Données :

$$E = 1.10^9 \text{ Pa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\alpha = 1.10^{-6}$$

Résultats :

$$F_y = -3.410^4 \text{ N}$$

$$F_{1x} = 7.8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{2x} = -1.2 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Sur cet exemple, les forces nodales et les réactions nodales coïncident car le seul chargement est un chargement température.

Si on restreint le calcul à la maille  $M2$ , les forces suivant  $OY$  restent les mêmes mais sont différentes suivant  $OX$ .

## 2.9.4 Exemple 3 : structure sous chargement réparti (poutre)

On considère une structure de type poutre encastree et soumise à un chargement de pesanteur sur sa moitié supérieure.

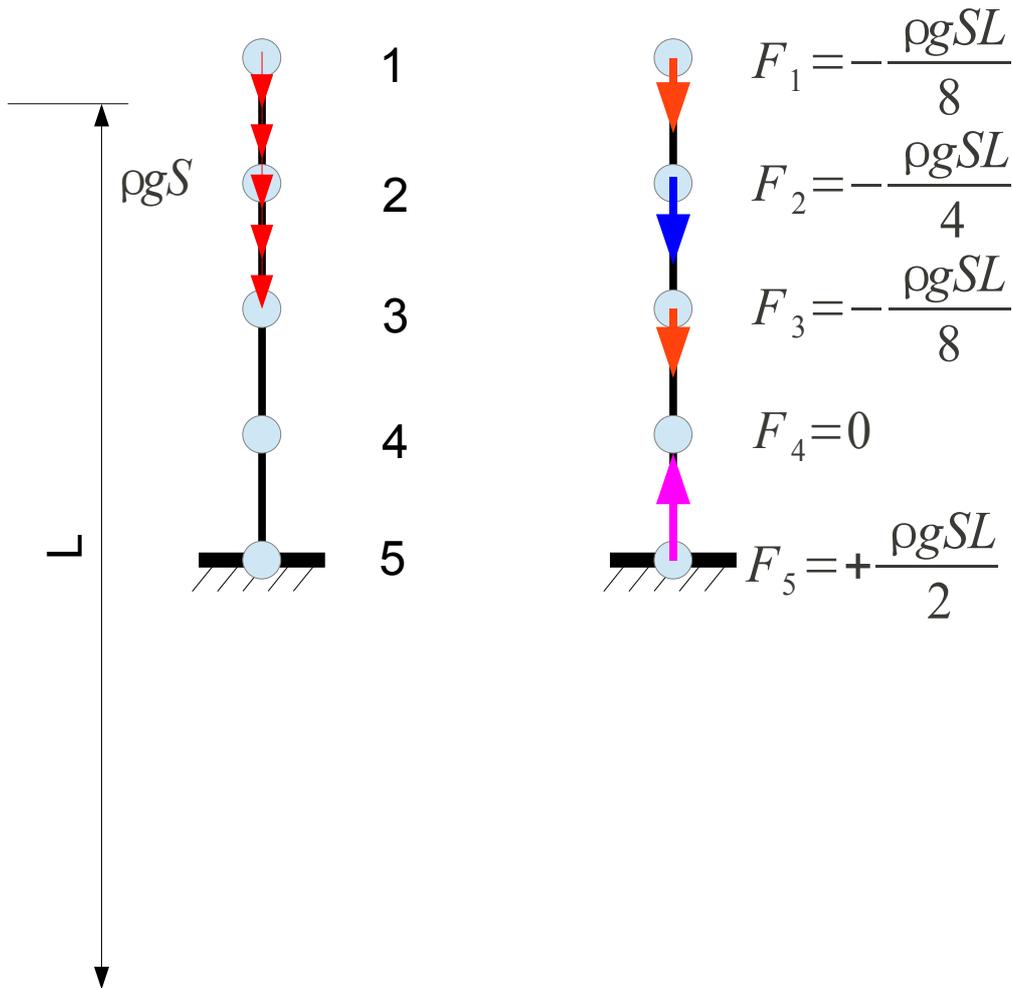


Figure 2.9.4-1: structure sous chargement réparti (gauche), FORC\_NODA (droite)

Sur ce type de structure, si l'on restreint le calcul des forces et des réactions nodales à une sous-partie des éléments, FORC\_NODA et REAC\_NODA ne donneront pas le même résultat sur l'interface entre la partie isolée et le reste de la structure comme le montre la figure 2.9.4-2 (sur la force  $F_3$ ).

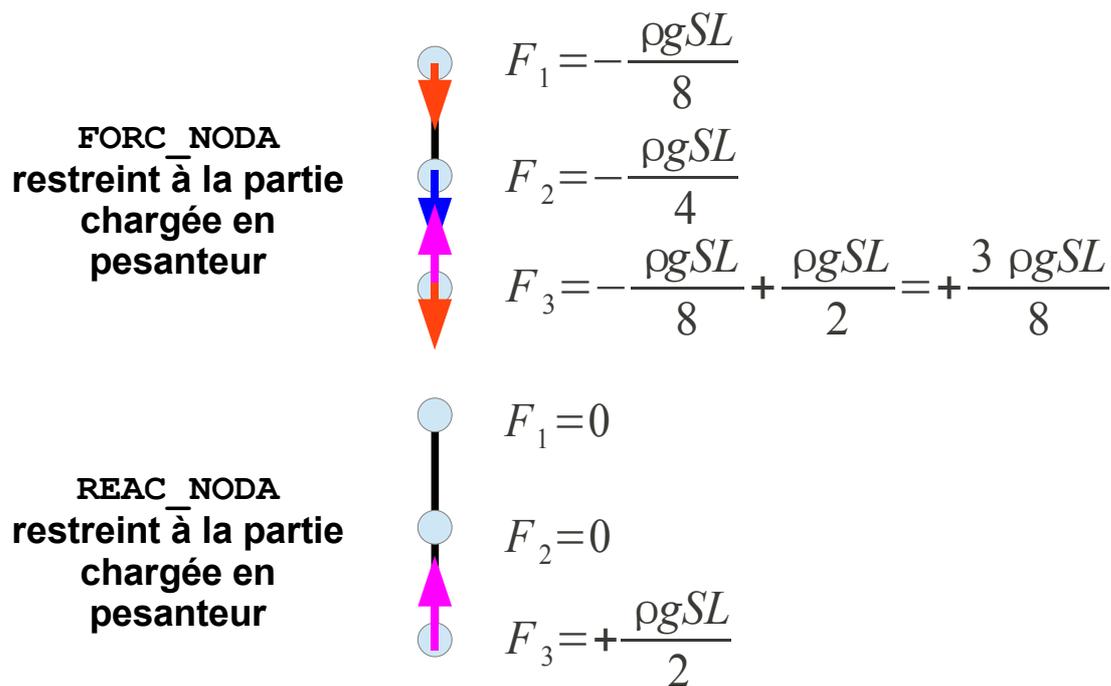


Figure 2.9.4-2: isolation d'une partie de la structure

## 2.10 Calcul d'un champ utilisateur

Le mot-clé facteur `CHAM_UTIL` permet de calculer des champs quelconques, dits « utilisateur » en raison du nom qui leur sera affecté dans le concept résultat.

Il peut y avoir plusieurs occurrences de `CHAM_UTIL` afin d'enchaîner le calcul de plusieurs champs.

Le traitement étant effectué à la fin de la commande `CALC_CHAMP`, les champs calculés par les mots-clés précédents (`CONTRAINTE`, `DEFORMATION`...) sont disponibles ici.

Soit on demande le calcul d'un critère prédéfini, soit on applique une ou plusieurs formules pour calculer un autre champ.

### 2.10.1 Opérande `NOM_CHAM`

Il s'agit du champ à partir duquel on fait les calculs. Le champ produit aura le même type : `ELGA`, `ELNO` ou `NOEU`.

### 2.10.2 Opérande `CRITERE`

Demande le calcul d'un critère prédéfini. Les critères sont (le paragraphe 2.6.5 fournit les expressions de chaque critère) :

- `VMIS` (pour les champs de contraintes),
- `INVA_2` (pour les champs de déformations),
- `TRACE` (pour les champs de contraintes ou de déformations).

Chacun de ces critères produit une composante (nommée `X1`).

Un des intérêts est de pouvoir calculer `INVA_2` de n'importe quel champ de déformations.

### 2.10.3 Opérande `FORMULE`

Ceci permet de calculer n'importe quelle expression fonction des composantes du champ fourni pour `NOM_CHAM`.

Le champ produit contiendra autant de composantes que de formules fournies : à la première formule correspondra la composante X1, à la deuxième X2, etc. Jusqu'à 30 composantes peuvent être ainsi créées.

Des exemples de formules permettant de retrouver les critères VMIS et INVA\_2 peuvent être trouvés dans la deuxième partie du test `sslv104a`.

## 2.10.4 Opérande NUME\_CHAM\_RESU

Le champ produit doit être rangé, de manière unique, dans le concept résultat. Les champs « utilisateur » sont donc numérotés en utilisant NUME\_CHAM\_RESU et le type du champ. Le nom du champ sera donc du type UT01\_ELGA, UT22\_NOEU, etc.

## 2.10.5 Exemple de calcul d'un champ utilisateur

Produit le champ UT02\_ELGA à deux composantes. X1 est la trace de SIGM\_ELGA (comparable à la composante TRSIG de SIEQ\_ELGA) et X2 est la contrainte équivalente de Von Mises (composante VMIS de SIEQ\_ELGA).

```
fTrace = FORMULE (NOM_PARA=('SIXX', 'SIYY', 'SIZZ'),
                  VALE=""SIXX+SIYY+SIZZ"")

fVonMis = FORMULE (NOM_PARA=('SIXX', 'SIYY', 'SIZZ', 'SIXY', 'SIXZ', 'SIYZ'),
                  VALE=""sqrt(3./2. * (SIXX**2 + SIYY**2 + SIZZ**2
                    + 2*SIXY**2 + 2*SIXZ**2 + 2*SIYZ**2 )
                    - 1./2. * fTrace(SIXX, SIYY, SIZZ)**2)"")

RES = CALC_CHAMP(reuse=RES,
                 RESULTAT=RES,
                 CHAM_UTIL=_F(NOM_CHAM='SIGM_ELGA',
                              FORMULE=(fTrace, fVonMis),
                              NUME_CHAM_RESU=2,))
```

## 2.11 Opérande TITRE

◇ TITRE = titre

Titre que l'on veut donner au résultat de la commande [U4.02.01].