

## 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.....	4
2.1 Opérandes RESULTAT/MODELE/CHAM_MATER/CARA_ELEM/EXCIT.....	10
2.1.1 Opérandes RESULTAT.....	10
2.1.2 Opérandes MODELE / CHAM_MATER / CARA_ELEM.....	10
2.1.3 Mot clé EXCIT.....	10
2.2 Sélection des mailles concernées par le calcul.....	10
2.3 Sélection des numéros d'ordre.....	11
2.4 Localisation des champs.....	11
2.5 Dépendance des champs.....	12
2.6 Opérandes pour les options mécaniques.....	12
2.6.1 Options de calcul des contraintes (Opérande CONTRAINTE).....	12
2.6.2 Options de calcul des déformations (Opérande DEFORMATION).....	15
2.6.3 Options d'extraction des variables internes (Opérande VARI_INTERNE).....	17
2.6.4 Options de calcul d'énergie (Opérande ENERGIE).....	18
2.6.5 Options de calcul de critères (Opérande CRITERES).....	21
2.6.6 Option de calcul des flux hydrauliques (Opérande HYDRAULIQUE).....	25
2.6.7 Options liées aux paramètres du calcul (Opérande PROPRIETES).....	25
2.7 Opérandes pour les options thermiques.....	25
2.7.1 Opérande THERMIQUE.....	25
2.8 Opérandes pour les options acoustiques.....	26
2.8.1 Opérande ACOUSTIQUE.....	26
2.9 Opérande pour les forces et les réactions nodales.....	28
2.9.1 Opérande FORCE.....	28
2.9.2 Exemple 1 : structure chargée avec force nodale (2 éléments QUAD4).....	32
2.9.3 Exemple 2 : structure avec chargement de température.....	33
2.9.4 Exemple 3 : structure sous chargement réparti (poutre).....	34
2.9.5 Exemple 4 : calcul des réactions d'appui au pied d'un barrage.....	35
2.10 Calcul d'un champ utilisateur.....	37
2.10.1 Opérande NOM_CHAM.....	37
2.10.2 Opérande CRITERE.....	37
2.10.3 Opérande FORMULE.....	37
2.10.4 Opérande NORME.....	37
2.10.5 Opérande NUME_CHAM_RESU.....	38
2.10.6 Exemple de calcul d'un champ utilisateur.....	38
2.11 Opérande pour les sous-points.....	38
2.11.1 Opérande SOUS_POINT.....	38
2.12 Opérande TITRE.....	39

<a href="#">2.13 Performance des calculs : parallélisme en espace ou en temps ?.....</a>	<a href="#">39</a>
--	--------------------

## 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]
    ◇ FONC_MULT = fm, [fonction]
    # si résultat de type evol_noli
    ◇ TYPE_CHARGE = / 'FIXE_CSTE', [DEFAULT]
                      / 'FIXE_PILO',
                      / 'SUIV',
                      / 'DIDI'

    # sinon
    ◇ TYPE_CHARGE = / 'FIXE_CSTE', [DEFAULT]

    # si résultat de type dyna_*, *_gene, *acou*
    ◇ PHAS_DEG = / phas_deg [R]
                  / 0. [DEFAULT]
    ◇ PUIS_PULS = / puis_puls [I]
                  / 0 [DEFAULT]
    ◇ FONC_MULT_C = / fonc_mult_c [fonction]
    ◇ COEF_MULT_C = / coef_mult_c [C]
  )
  ◇ # Sélection des mailles concernées par le calcul
    / TOUT = 'OUI', [DEFAULT]
    / GROUP_MA = l_grma, [l_gr_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]

  ◇ # Accélération des options REAC/FORC_NODA et ***_NOEU
    | PARALLELISME_TEMPS = / 'NON', [DEFAULT]
                          / 'OUI'.

  ◇ | 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'  
                    | 'ENTR_ELEM'  
                    | '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 concernant les propriétés du calcul  
  
◇ PROPRIETES =      | 'MATE_ELGA'  
                    | 'MATE_EL EM'
```

# 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'
| 'ENTR_ELEM'
| '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 de calcul des flux hydrauliques (éléments THM)

◇ HYDRAULIQUE = | 'FLHN_ELGA'

# options concernant les propriétés du calcul

◇ PROPRIETES = | 'MATE_ELGA'
| 'MATE_ELEM'

# 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]  
/ NORME = | 'L2',  
| 'FROBENIUS'  
◆ 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.

**Remarques :**

- 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 ;
- Une exception notable concerne toutefois les structures de données dynamiques issues de *DYNA\_VIBRA* pour lesquelles l'utilisateur doit assurer lui-même la cohérence des mots-clés entre l'opérateur de calcul et *CALC\_CHAMP*. Une alarme l'en avertit.

### 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 = carac

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\_VIBRA* [U4.53.03].

## 2.2 Sélection des mailles concernées par le calcul

Les mots clés *TOUT* et *GROUP\_MA* 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

Seules les mailles incluses dans *l\_grma* 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].

Dans le cas où il y a beaucoup de numéros d'ordre, il peut être plus performant (en mémoire notamment) d'appeler la commande plusieurs fois sur des sous-listes des numéros d'ordre.

## 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.*

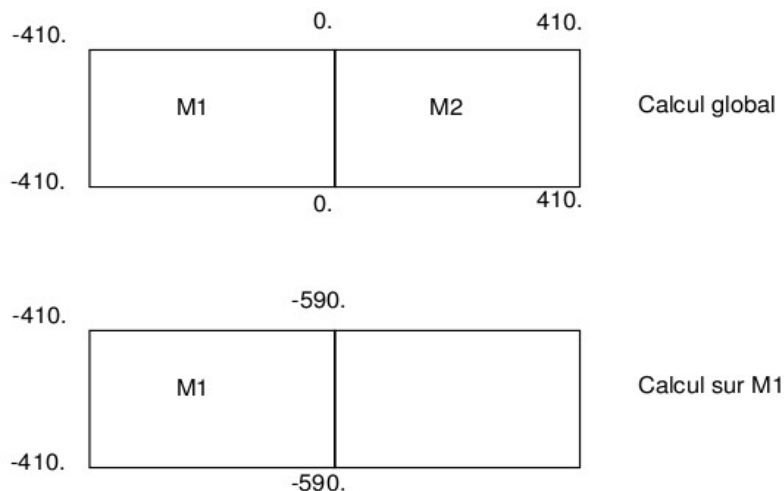
### Remarque 2 :

*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 le mot-clé `GROUP_MA` est renseigné 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].

Pour les formulations incompressibles (INCO\_UP, INCO\_UPO et INCO\_UPG), ce tenseur contient en plus des composantes SIXX, SIYY, SIZZ, SIXY, SIYZ et SIXZ en 3D, la composante SIP qui est la pression hydrostatique. Cette composante est calculée à partir de la trace des contraintes (partie de la loi de comportement) et des inconnues PRES et GONF (pour INCO\_UPG) du champ des inconnues

nodales. Les composantes  $S_{IXX}$ ,  $S_{IYY}$  et  $S_{IZZ}$  sont alors les contributions purement déviatoriques du tenseur des contraintes

## 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) ou sur l'arête d'une surface.

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 $SIG_{T2}$
SIG_TN	Valeur $SIG_{TN}$

Ces champs sont évalués à partir d'un champ de contraintes calculés sur les mailles volumiques (MODELISATION='3D' ou '3D\_SI') ou surfaciques (MODELISATION='D\_PLAN' ou 'D\_PLAN\_SI'). Pour des mailles volumiques, la procédure est la suivante :

- Identification des mailles volumiques correspondant aux facettes du groupe de mailles surfaciques. Pour chaque facette (maille surfacique), on choisit la maille volumique située du côté « - » de la normale à la facette. S'il n'y a pas de maille volumique du côté « - » de la facette, on ne calcule pas SIRO\_ELEM sur cette facette ;
- 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  $SIG_{T2}$

Pour des mailles surfaciques, la procédure d'évaluation du champ SIRO\_ELEM est la même que pour les mailles volumiques, en tenant compte des conventions suivantes :

- $\vec{\sigma}_{t2}$  colinéaire à la direction Z (un modèle D\_PLAN étant défini exclusivement dans le plan XY),  $\vec{\sigma}_{t1}$  étant donc dans le plan XY.

- $SIG\_NZ = SIG\_TZ = 0.$  et  $SIG\_T1Z = SIGT2X = SIGT2Y = 0.$
- $SIG_{TN}$  est la valeur de la contrainte de cisaillement dans le plan XY.

**Remarque 1 :**

Dans le cas de facettes/arêtes plongées dans le volume/surface, l'utilisateur a la possibilité grâce à la commande `MODI_MALLAGE / ORIE_PEAU_3D / GROUP_MA_VOLU` ou `MODI_MALLAGE / ORIE_PEAU_2D / GROUP_MA_SURF` de réorienter cette normale comme il le souhaite. Il peut ainsi choisir la maille volumique qui sera utilisée pour le calcul. Si du côté « - », on trouve une maille de « joint » (qui est volumique/surfacique), le calcul de `SIRO_ELEM` est impossible car les contraintes stockées dans les éléments de joint ne permettent pas le calcul détaillé ci-dessus.

**Remarque 2 :**

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

## 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'

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

| 'DEGE\_ELNO'

| 'DEGE\_NOEU'

Calcul des déformations généralisées à partir des déplacements. Cette option n'a de sens que pour les éléments de structure de poutre, plaque et 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. Les déformations de séchage et d'hydratation sont aussi soustraites ainsi que les déformations de pression de fluide et les déformations anélastiques. Par contre les déformations de fluage ne sont pas soustraites.

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

| '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 EP\_SECH (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 EP\_HYDR (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.

```
| 'EPSL_ELGA'
| 'EPSL_ELNO'
| 'EPSL_NOEU'
```

Calcul des déformations logarithmiques.

$$E_l(u) = \frac{1}{2} (\ln(F^T F))$$

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

```
| 'VARC_ELGA'
```

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

Liste des composantes du champ :

TEMP	Cf. documentation de la commande AFFE_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	Énergie élastique en membrane
FLEXION	Énergie élastique en flexion
CISAILLE	Énergie élastique en cisaillement
COUPL_MF	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	Énergie élastique en membrane
FLEXION	Énergie élastique en flexion
CISAILLE	Énergie élastique en cisaillement
COUPL_MF	Énergie élastique de couplage membrane-flexion

Remarque :

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

| 'ENTR\_ELEM'

Calcul de l'énergie élastique modifiée de traction. En mécanique de la rupture, il se peut que l'on est besoin d'estimer une énergie élastique dite de traction, ainsi l'idée consiste à calculer une énergie élastique modifiée, permettant d'annihiler la participation de la compression sphérique et de la compression suivant chaque directions propres de déformation. Ainsi l'énergie élastique devient:

$$E_{el}^{traction} = \frac{\lambda}{2} H(tr(\epsilon)) tr(\epsilon)^2 + \mu \sum_{i=1}^3 H(\epsilon_i) \epsilon_i^2$$

où  $H$  représente la fonction Heaviside,  
 $\epsilon$  représente le tenseur des déformations élastiques,  
 $\epsilon_i$  représente les déformations élastique principales.

Liste des composantes du champ :

TOTALE	Énergie élastique modifiée de traction
--------	--

Remarque :

Pour l'instant, uniquement valide en petites déformations (  $DEFORMATION = PETIT$  ou  $DEFORMATION = PETIT\_REAC$  ).

| '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 :

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

- pour les éléments de poutres :

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

- pour les éléments de plaques et coques :

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

| '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 liée 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  $\sigma^*$  :

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

$$\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) \cdot \mathbf{Id}$$

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

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

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

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

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'
| 'EPGQ_ELGA'
| 'EPGQ_ELNO'
| 'EPGQ_NOEU'
```

Calcul de la déformations équivalentes :

Les champs `EPEQ_*` sont calculées à partir des champs `EPSI_*` (déformations en petit déplacement), les champs `EPGQ_*` sont calculées à partir des champs `EPGQ_*` (déformations de Green-Lagrange) et les champs `EPMQ_*` sont calculées à partir des champs `EPME_*` (déformations mécaniques).

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 $\epsilon$
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 :

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

Cette expression est équivalente à celle de la norme  $\bar{\epsilon}$  du code RCC-CW.

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22} - \epsilon_{33})^2 + (\epsilon_{33} - \epsilon_{11})^2 + 6(\epsilon_{12}^2 + \epsilon_{23}^2 + \epsilon_{31}^2)}$$

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 :  $\det(N \cdot \mathbf{H} \cdot N) \leq 0$ , où  $\mathbf{H}$  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 donné par l'expression suivante :

$$\text{TRIAX} = \frac{\text{TRSIG}}{3 \times \text{VMIS}}$$

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

| 'FLHN\_ELGA'

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

$\mathbf{M}_{ij}$  est le vecteur flux hydraulique du composant  $ij$ .

Liste des composantes du champ :

FH11	
FH22	
FH12	
FH21	

## 2.6.7 Options liées aux paramètres du calcul (Opérande PROPRIETES)

| 'MATE\_ELGA'

| 'MATE\_ELEM'

Récupération des valeurs des paramètres matériaux élastiques  $E$ ,  $\nu$ ,  $RHO$ ,  $\alpha$  et thermiques  $\lambda$ ,  $\rho_{cp}$  avec prise en compte de la dépendance aux variables de commande et à l'instant de calcul. Une valeur nulle est affectée aux composantes du champ si les paramètres associés n'ont pas été renseignés dans `DEFI_MATERIAU`. Les coordonnées des points d'intégration sont également présentes dans le champ.

Ces options sont uniquement disponibles pour les comportements `ELAS`, `ELAS_FO`, `THER`, `THER_FO`, `THER_NL`.

Pour le champ `MATE_ELGA`, on calcule les valeurs à chaque point de Gauss, pour le champ `MATE_ELEM`, on calcule les valeurs au barycentre de l'élément (famille `FPG1`).

Pour le champ `MATE_ELGA` et les éléments de frontière absorbante (`3D_ABSO`, `D_PLAN_ABSO`) les coordonnées spatiales prises en compte sont celles du barycentre de l'élément (comme dans les autres options de calcul). Les valeurs à chaque point de Gauss sont donc toujours égales entre elles et aussi avec les valeurs du champ `MATE_ELEM`.

## 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 Opérands 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 (moments)

Les forces nodales correspondent au sens éléments finis aux forces intérieures participant aux équations d'équilibre. Le calcul des forces nodales généralisées  $\mathbf{F}_K$  se fait de la façon suivante :

$$\sum_K \mathbf{F}_K \cdot \mathbf{v}_K = \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}_K) d\Omega = \sum_K \int_K \boldsymbol{\sigma}^K \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}_K) dK = \sum_K \int_K \boldsymbol{\sigma}^K \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{v}_K dK \quad (1)$$

Avec :

- $\boldsymbol{\sigma}^K$  contraintes aux points de Gauss de l'élément  $K$  ;
- $\mathbf{B}$  l'opérateur éléments finis de déformations généralisées (matrice reliant les déformations du 1<sup>er</sup> ordre aux déplacements généralisés) ;
- $\mathbf{v}_K$  déplacement élémentaire unitaire généralisé.

D'où :

$$\mathbf{F}_K = \left\{ \int_K \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\sigma}^K dK \right\} \quad (2)$$

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

#### Cas bi-dimensionnel

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.

#### Cas des éléments de structures

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.

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. Dans le cas de comportements homogénéisés de coque type ELAS\_COQUE, il est préférable de regarder EFGE\_NOEU.

## Cas bi-dimensionnel de la thermo-hydro-mécanique (THM)

En (thermo-)hydro-mécanique, cf. § 8, [R7.01.10], les forces nodales généralisées associées à chaque composante correspondent aux forces mécaniques et aux flux. Si on note  $Q^T \sigma_0$  le résultat de FORC\_NODA, pour les équations hydrauliques, alors pour un pas de temps  $\Delta t$ , on a :

$$\int_{\Omega} Q^T \sigma_0 \cdot p^* d\Omega = -\Delta t \int_{\Omega} \mathbf{M}^- \cdot \nabla p^* d\Omega \quad (3)$$

Les flux sont pris à l'instant  $t^-$  à cause du  $\theta^-$ -schéma employé, cf. [R7.01.10].

Si on note  $\mathbf{q}$  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 respectivement aux contraintes généralisées  $M_1^1, M_1^2, M_2^1, M_2^2$ , cf. § 2.2, [R7.01.10]), alors l'expression de FORC\_NODA est la suivante :

- au degré de liberté PRE1 en saturé par exemple est associé le flux d'eau

$$-\Delta t \int_{\Omega} (\mathbf{M}_{vp} + \mathbf{M}_w)^- \cdot \nabla p^* d\Omega \quad (4)$$

- au degré de liberté PRE2 en non saturé est associé le flux du composant gazeux

$$-\Delta t \int_{\Omega} (\mathbf{M}_{ad} + \mathbf{M}_{as})^- \cdot \nabla p^* d\Omega \quad (5)$$

- au degré de liberté TEMP est associé le flux thermique

$$-\Delta t \int_{\Omega} \mathbf{q}^- \cdot \nabla T^* d\Omega \quad (6)$$

| 'REAC\_NODA'

Calcul des forces nodales de réactions généralisées aux nœuds, à partir des contraintes aux points de Gauss et des chargements. Liste des composantes du champ :

DX DY DZ	Réactions nodales
Composantes supplémentaires pour les éléments de structure :	
DRX DRY DRZ	Réactions nodales (moments)

Les réactions nodales généralisées correspondent au sens éléments finis aux forces exercées sur les appuis (conditions aux limites) participant aux équations d'équilibre.

## Cas de la statique

En statique, pour les concepts résultat de type evol\_elas, mult\_elas, fourier\_elas ou evol\_noli, le calcul des réactions nodales généralisées  $\mathbf{R}_K$  se fait par :

$$\sum_K \mathbf{R}_K \cdot \mathbf{v}_K = \sum_K \mathbf{F}_K \cdot \mathbf{v}_K - \mathbf{L}(\mathbf{v}_K) \quad (7)$$

Avec :

- $\sum_K \mathbf{F}_K \cdot \mathbf{v}_K$  l'expression des forces nodales (option FORC\_NODA, voir (1) et (2)) ;

- $\mathbf{v}_K$  déplacement élémentaire unitaire généralisé.

Et on a :

$$\mathbf{L}(\mathbf{v}_K) = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}_K d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{F}_s \cdot \mathbf{v}_K d\Gamma + \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{v}_{Ki} \quad (8)$$

Avec :

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

Le vecteur des réactions nodales généralisées sur l'élément  $K$  s'obtient donc à partir des forces nodales généralisées :

$$\mathbf{R}_K = \mathbf{F}_K - \int_K \mathbf{f} dK - \int_{\partial K} \mathbf{F} \partial K - \sum_i \mathbf{F}_{iK} \quad (9)$$

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

**Remarque** : à noter que le chargement de température ne figure pas dans les forces extérieures : il intervient dans l'expression des contraintes via la loi de comportement.

## Cas de la dynamique transitoire non-linéaire

Pour les concepts résultat de type `evol_noli` issus de calculs dynamiques transitoires non-linéaires, pour obtenir les réactions nodales, il convient d'ôter de surcroît les efforts d'inertie (accélération) et d'amortissement liés à la vitesse :

$$\sum_K \mathbf{R}_K \cdot \mathbf{v}_K = \sum_K \mathbf{F}_K \cdot \mathbf{v}_K + (\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}) \cdot \mathbf{v}_K - \mathbf{L}(\mathbf{v}_K) \quad (10)$$

Où :

- $\sum_K \mathbf{F}_K \cdot \mathbf{v}_K$  l'expression des forces nodales (option `FORC_NODA`, voir ( 1 ) et ( 2 )) ;
- $\mathbf{v}_K$  déplacement élémentaire unitaire généralisé.
- $\mathbf{M}$  est la matrice de masse ;
- $\ddot{\mathbf{u}}$  le champ d'accélération généralisée ;
- $\mathbf{L}$  le vecteur des forces extérieures généralisées appliquées (équation (8)).

## Remarques :

- les contributions de l'amortissement liées directement à la vitesse sur les réactions nodales sont négligées ;
- le calcul des efforts d'inertie requiert la présence du champ d'accélération `ACCE` dans la structure de données `resultat`. Dans le cas d'une structure de type `evol_noli`, il n'est pas possible pour le code de vérifier sa présence, il convient donc de prendre garde.

## Cas de la dynamique modale

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

$$\sum_K \mathbf{R}_K \cdot \mathbf{v}_K = \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}_K) d\Omega - \omega^2 (\mathbf{M} \cdot \mathbf{u}) \cdot \mathbf{v}_K \quad (11)$$

Où :

- $\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}))$  sont les contraintes modales généralisées ;
- $\mathbf{M}$  est la matrice de masse ;
- $\omega$  la pulsation propre ;
- $\mathbf{u}$  le champ de déplacement généralisé du mode ;
- $\mathbf{v}_K$  déplacement élémentaire unitaire généralisé.

## Cas de la dynamique transitoire linéaire

Pour les concepts résultat de type `dyna_trans` issus de calculs dynamiques transitoires linéaires (`DYNA_VIBRA/TYPE_CALCUL='TRAN'`) ou de type `dyna_harmo` issus de calculs harmoniques (`DYNA_VIBRA/TYPE_CALCUL='HARM'`) l'expression des réactions nodales généralisées s'obtient par :

$$\sum_K \mathbf{R}_K \cdot \mathbf{v}_K = \sum_K \mathbf{F}_K \cdot \mathbf{v}_K + (\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}) \cdot \mathbf{v}_K - \mathbf{L}(\mathbf{v}_K) \quad (12)$$

Où :

- $\sum_K \mathbf{F}_K \cdot \mathbf{v}_K$  l'expression des forces nodales (option `FORC_NODA`, voir ( 1 ) et ( 2 )) ;
- $\mathbf{v}_K$  déplacement élémentaire unitaire généralisé.
- $\mathbf{M}$  est la matrice de masse ;
- $\ddot{\mathbf{u}}$  le champ d'accélération généralisée ;
- $\mathbf{L}$  le vecteur des forces extérieures généralisées appliquées (équation (8)).

## Utilisation de `GROUP_MA` dans `FORC_NODA` et `REAC_NODA`

Si le mot clé `GROUP_MA` est renseigné,  $\mathbf{F}_K$  (option `FORC_NODA`) 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.

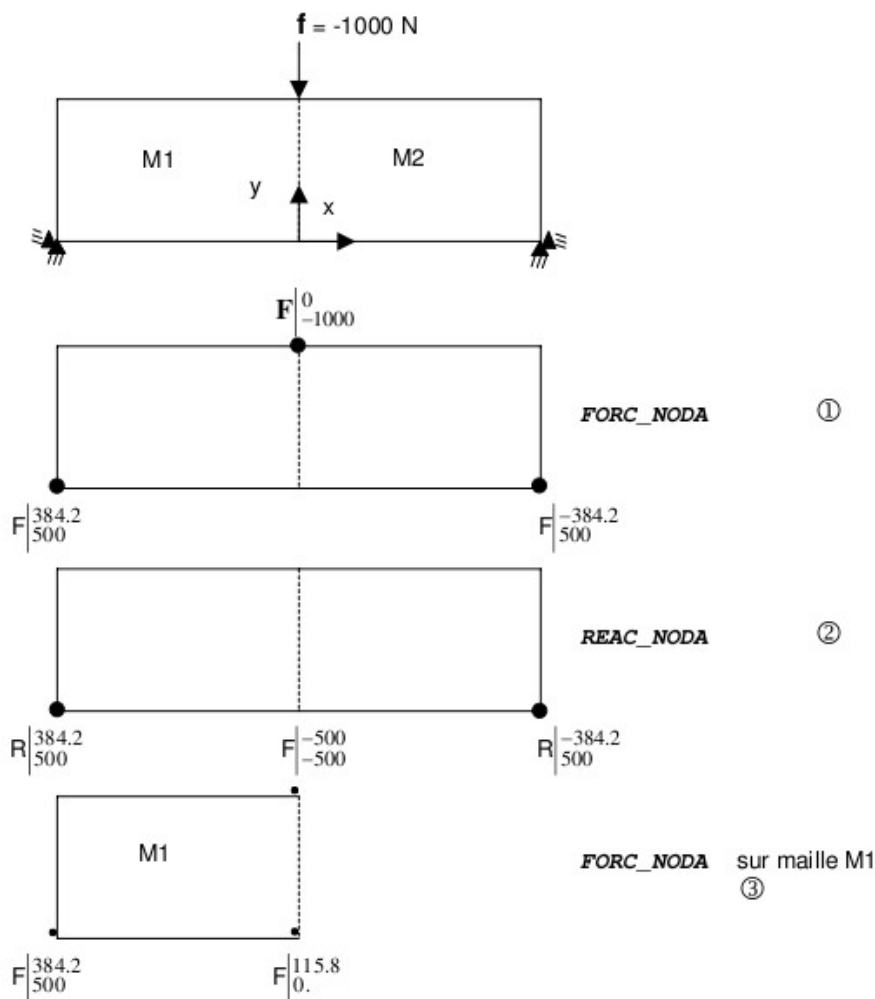
**Attention ! Le calcul de 'REAC\_NODA' sur un sous-ensemble du modèle (via le mot clé `GROUP_MA`) doit être fait avec prudence. L'exemple 4 ci-dessous illustre ce type de calcul.**

Pour les résultats de type `dyna_harmo`, le 'REAC\_NODA' se calcule uniquement sur le modèle en entier. Le calcul sur un sous-ensemble du modèle peut être réalisé manuellement en effectuant un calcul de 'FORC\_NODA' sur le groupe de mailles en question puis en retranchant la force extérieure sur les résultats obtenus.

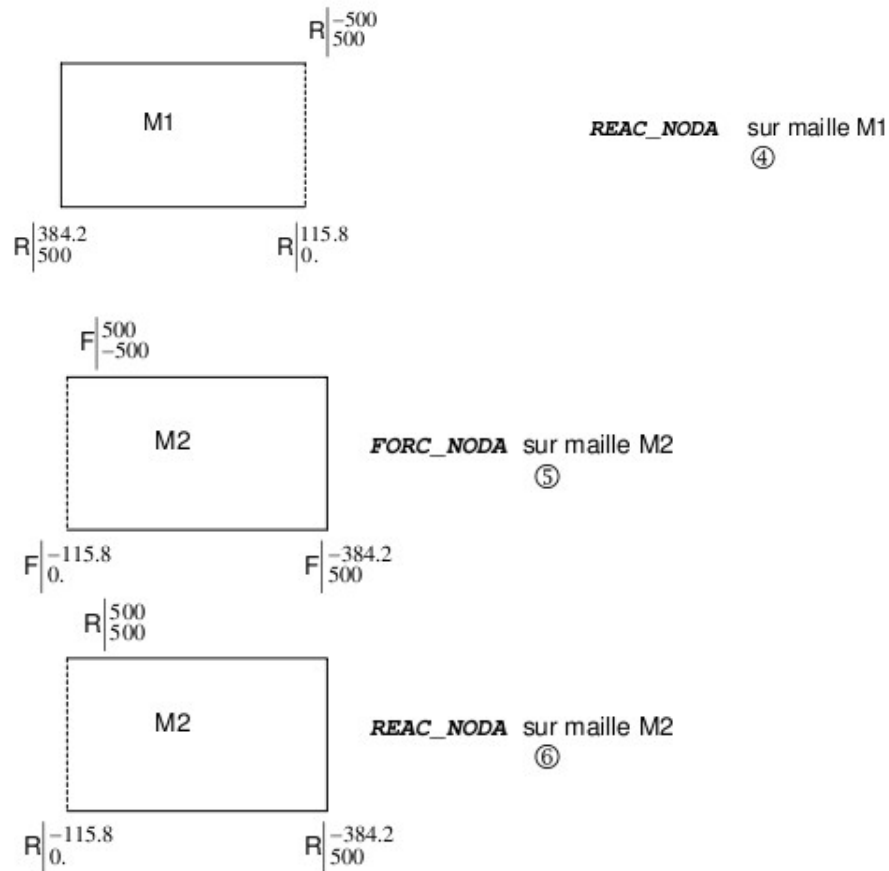
## Remarques :

- 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) ;
- Le fait de négliger l'apport de l' **amortissement en dynamique** peut créer un léger écart par rapport au résultat exact ;
- Seule la résultante des forces ou des réactions nodales sur un groupe de nœuds a un sens physique (ce groupe doit correspondre à au moins un élément du modèle, par exemple un bord soumis à une condition aux limites). Elle peut être calculée avec `POST_RELEVE_T` [U4.81.21] . Ponctuellement, le champ `FORC_NODA` ou `REAC_NODA` ne doit pas être interprété car la valeur en un nœud est directement liée à la finesse du maillage. De plus le signe de ces forces sur les nœuds d'un même élément peut être contre-intuitif alors qu'il est parfaitement en accord avec la théorie des éléments finis (par exemple sur des mailles `QUAD8` situées à l'interface d'une zone en compression pure, les signes des forces nodales aux sommets et aux milieux sont opposés) ;
- Le calcul de `REAC_NODA` tient compte des chargements répartis sur les poutres. Dès lors que vous faites varier ce chargement sur un calcul non-linéaire (changement de `EXCIT` d'un pas de temps à l'autre), le calcul de `REAC_NODA` est interdit. Il est nécessaire de diviser son post-traitement en « paquets » de numéros d'ordre, pour lesquels le chargement est constant (c'est-à-dire qu'il utilise le même concept `AFFE_CHAR_MECA` dans `EXCIT`).
- Certains chargements ne sont pas pris en compte lors du calcul de cette option, il s'agit de : `INTE_ELEC`, `FORCE_SOL` et `RELA_CINE_BP`.

## 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.

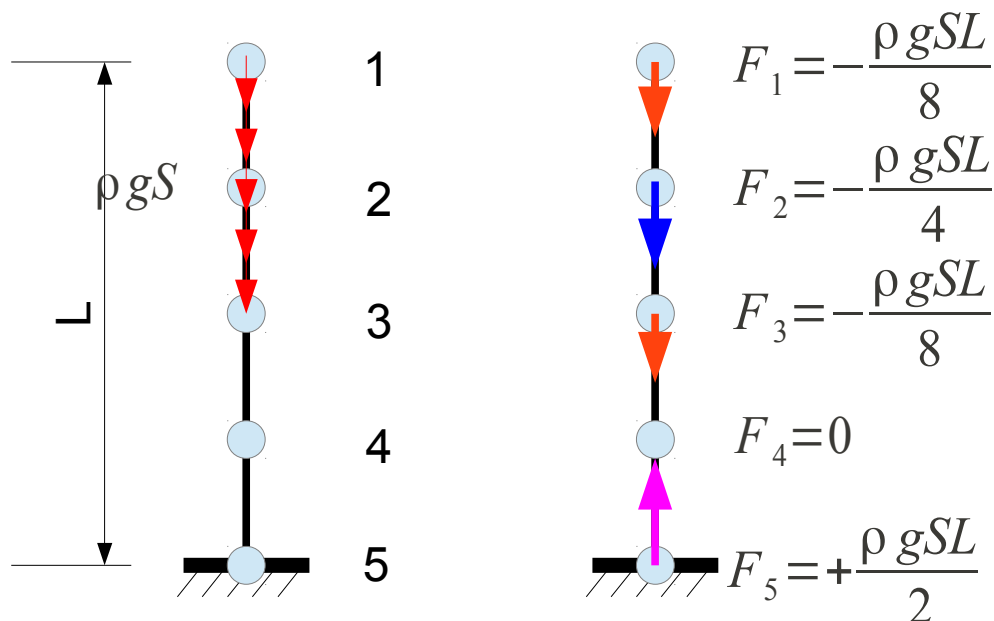


Figure 2.9.4-1: structure sous chargement réparti (gauche), FORC\_NODA (droite)

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  $F_3$ ).

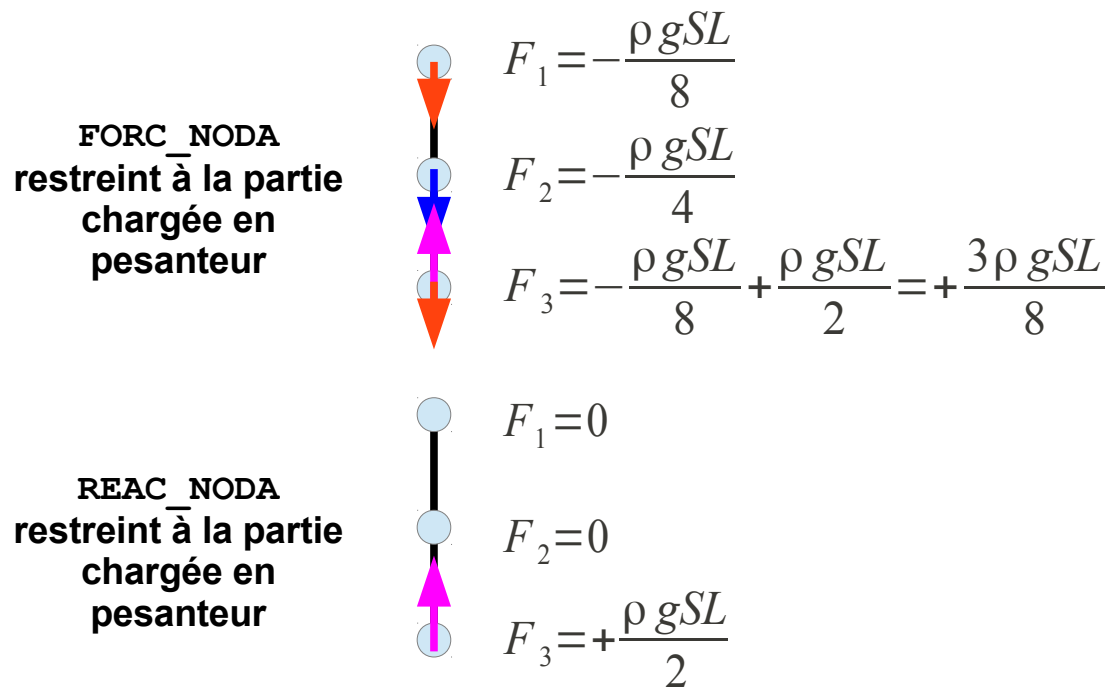


Figure 2.9.4-2: isolement d'une partie de la structure

## 2.9.5 Exemple 4 : calcul des réactions d'appui au pied d'un barrage

Dans cet exemple, on schématise (très grossièrement !) un barrage en 2D. Le barrage est représenté par un triangle DEF posé sur une fondation représentée par un rectangle ABCG (voir schéma ci-dessous).

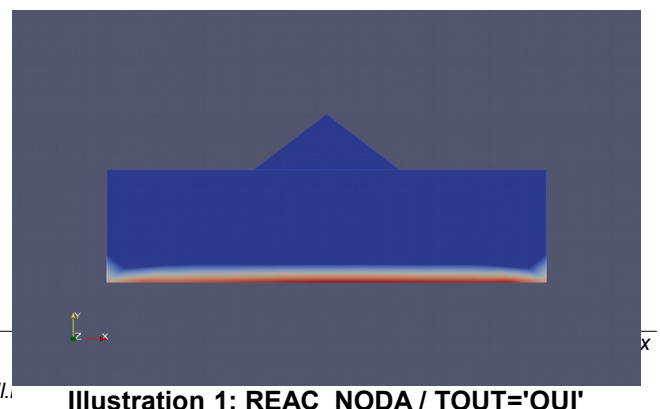
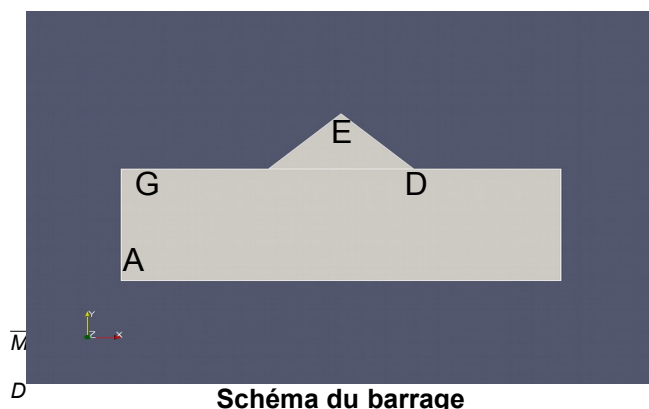
On aimerait calculer les réactions d'appui du barrage sur sa fondation.

Les chargements sont :

- La pesanteur (qui s'applique au barrage et à sa fondation)
- Le chargement de pression du à la retenue d'eau (côté amont) appliqué sur les bords CD et DE.
- La fondation est encastree sur AB.

Sur les illustrations suivantes, on a représenté la norme du champ REAC\_NODA lorsqu'on utilise le mot clé GROUP\_MA de différentes façons :

- Illustration 1 : on n'utilise pas GROUP\_MA (TOUT='OUI')
- Illustration 2 : GROUP\_MA='BARRAGE'
- Illustration 3 : GROUP\_MA=('BARRAGE', 'DE')
- Illustration 4 : GROUP\_MA=('BARRAGE', 'DE', 'CD')



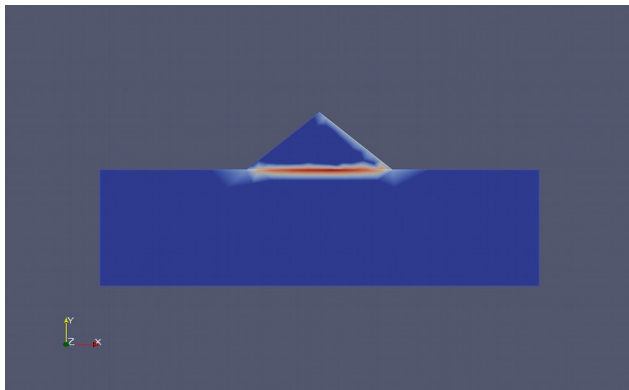


Illustration 2: REAC\_NODA /  
GROUP\_MA='BARRAGE'

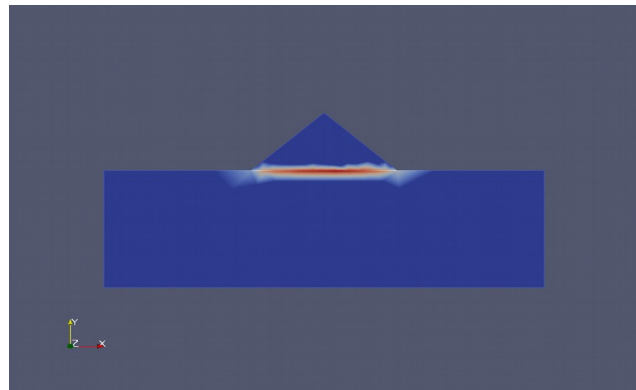


Illustration 3: REAC\_NODA /  
GROUP\_MA=('BARRAGE','DE')

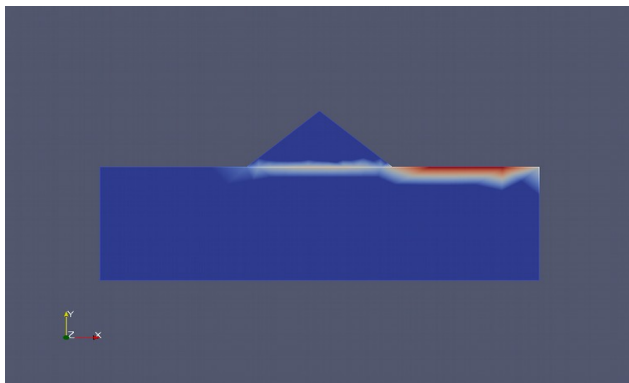


Illustration 4: REAC\_NODA /  
GROUP\_MA=('BARRAGE','DE','CD')

## Commentaires :

- L'illustration 1 montre que quand on n'utilise pas le mot clé `GROUP_MA`, les réactions d'appui ne sont non-nulles que sur le bord du modèle où l'on impose des déplacements (ici AB).
- L'illustration 2 montre que si l'on calcule `REAC_NODA` sur le seul groupe `BARRAGE` (formé seulement d'éléments « volumiques ») des réactions non nulles apparaissent sur `DE` (ce que l'on cherche) mais aussi sur `DE`, ce qui doit nous alerter. La raison de ce comportement est que le chargement de pression sur `DE` n'a pas été calculé, car les éléments de bord qui calculent ce chargement ne font pas partie du groupe `BARRAGE`.
- L'illustration 3 montre que si l'on calcule `REAC_NODA` sur les groupes `BARRAGE` et `DE`, les réactions sont celles que l'on cherche : elles ne sont non nulles que sur `DE`. Remarque : l'image semble montrer que des réactions non nulles existent sur une partie de `CD` et `FG`, mais c'est une illusion due à la visualisation : les forces nodales en `D` et `F` « bavent » sur les éléments adjacents.
- L'illustration 4 montre qu'il ne faut pas ajouter trop de groupes de bord (ici `CD`). On voit que des réactions d'appuis non nulles apparaissent sur `CD`. Dans ce cas, la réaction sur le point `D` est fausse.

## Conclusion

*Si l'on veut calculer les réactions d'appui du barrage sur sa fondation, il faut demander le calcul de `REAC_NODA` en précisant exactement **toutes** les mailles du barrage et **toutes** les mailles de son bord soumis à un chargement réparti.*

*Il est vivement conseillé de visualiser les réactions calculées pour vérifier qu'elles ne sont nulles que sur l'interface entre le barrage et sa fondation.*

## 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.

Le champ en sortie est systématiquement prolongé à zéro sur les autres composantes et là où le champ en entrée n'est pas défini.

Des exemples de formules permettant de retrouver les critères `VMIS` et `INVA_2` peuvent être trouvés dans la deuxième partie du test `sslvl04a`.

### 2.10.4 Opérande `NORME`

Demande le calcul d'une norme prédéfinie. Les normes sont :

- `L2` : norme  $L_2$  d'un tenseur
- `FROBENIUS` : norme de Frobenius d'un tenseur

La norme calculée est une quantité intégrée (au sens faible) sur un élément  $\Omega_e$ . Pour un tenseur  $A$ , la norme  $L_2$  vaut :

$$N_{L_2} = \int_{\Omega_e} \sqrt{A:A} \cdot d\Omega_e \quad (13)$$

La norme de Frobenius sur les composantes  $A_{ij}$  d'un tenseur  $A$  :

$$N_F = \int_{\Omega_e} \sum_{i,j} |A_{ij}| \cdot |A_{ij}| \cdot d\Omega_e \quad (14)$$

Chacune de ces normes produit une composante (nommée `x1`) sur un élément. Il s'agit donc d'un champ `ELEM`. Il est à noter que la différence entre les deux normes vient des termes croisées (hors diagonale).

## 2.10.5 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.

## 2.10.6 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 pour les sous-points

### 2.11.1 Opérande SOUS\_POINT

' DEPL\_ELGA '

Calcul des déplacements aux sous-points.

Pour visualiser un `CHAMP_ELGA` sur la structure "déformée", un champ `DEPL_ELGA` est calculé à partir du champ `DEPL` (aux nœuds) à l'aide des fonctions de forme de l'élément.

Pour les éléments à sous-points, la connaissance des fonctions de forme ne suffit pas, il faut également connaître la position des sous-points ainsi que les équations cinématiques reliant les déplacements de l'élément support aux déplacements des sous-points. Ces informations sont seulement disponibles via le `CARA_ELEM`.

Le champ `DEPL_ELGA` a pour composantes `DX`, `DY`, `DZ`.

' TEMP\_ELGA '

Calcul de la température aux sous-points. Cette option permet de connaître la température qui est utilisée lors d'un calcul mécanique dans la loi de comportement.

Pour les éléments à sous-points, il est nécessaire de connaître la position des sous-points. Ces informations sont seulement disponibles via le `CARA_ELEM`.

Le champ `TEMP_ELGA` a pour composante `TEMP`.

## 2.12 Opérande TITRE

◇ TITRE = titre

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

## 2.13 Performance des calculs : parallélisme en espace ou en temps ?

◇ PARALLELISME\_TEMPS = 'OUI'/'NON' [DEFAULT] (actif uniquement pour les options REAC/FORC\_NODA et \*\*\*\_NOEU).

Par défaut, lorsque le parallélisme MPI est activé<sup>1</sup> (cf. [U2.08.06]), les options de calcul bénéficient généralement ici d'un **parallélisme dit « en espace »**. C'est-à-dire que les calculs sont distribués sur les processus parallèles par paquets de mailles. Un processus MPI va gérer, pour tous les pas de temps, les calculs élémentaires requis par un groupe de mailles donné.

Mais, outre que ce parallélisme est peu efficient pour les options impliquant directement peu ou pas de calculs élémentaires (telles les options REAC/FORC\_NODA et \*\*\*\_NOEU), il suscite d'autre part des communications MPI importantes et répétées<sup>2</sup>.

Pour les options pré-citées, on lui préfère donc le **parallélisme dit « en temps »** qui, lui, distribue, pour toutes les mailles, les calculs (élémentaires ou non) requis par un paquet de pas de temps. Les communications sont donc moins coûteuses<sup>3</sup> et le parallélisme est étendu à des portions de code au-delà des calculs élémentaires.

Avec ce parallélisme, les accélérations peuvent aller de X5 à X50 suivant la configuration des calculs. L'activation de ce parallélisme est effectué dans un CALC\_CHAMP donné<sup>4</sup> et elle concerne toutes les options de calcul susceptibles d'en bénéficier : REAC/FORC\_NODA et \*\*\*\_NOEU et toutes les options de calculs sous-jacentes<sup>5</sup>.

Sur un CALC\_CHAMP coûteux, comportant des calculs REAC/FORC\_NODA ou \*\*\*\_NOEU sur de longs transitoires et/ou sur de gros modèles, on conseille donc d'activer ce parallélisme en temps : PARALLELISME\_TEMPS='OUI'. Et, contrairement à celui en espace, il n'a pas besoin d'une granularité minimum<sup>6</sup> pour être efficace. Dès la dizaine de pas de temps par processus MPI, l'accélération procurée par le parallélisme en temps peut être notable<sup>7</sup>.

Le type de parallélisme actif (en espace, en temps ou aucun) est précisé, option par option, dans le fichier de message. Pour plus de détails on pourra consulter la notice d'utilisation du parallélisme [U2.08.06].

### Remarque s sur le parallélisme :

- Le parallélisme en temps, lorsqu'il est activé dans l'opérateur, concerne tous les traitements informatiques susceptibles d'en bénéficier. Pour ce faire, on « débranche » en sous-main et ponctuellement, option par option, le parallélisme en espace. Celui-ci est ensuite réactivé, « comme si de rien n'était », dans les options suivantes si celles-ci ne sont pas, à leur tour, concernées par le parallélisme en temps. Ainsi l'appel  

```
CALC_CHAMP(EFGE_ELGA, REAC_NODA, ETOT_ELGA, EPSI_NOEU,  
PARALLELISME_TEMPS='OUI')
```

activera le parallélisme en espace pour les options n°1 et n°3 et celui en temps pour les autres. Il est équivalent, d'un point de vue parallélisme, à la séquence d'appels :  

```
CALC_CHAMP(EFGE_ELGA, ETOT_ELGA)  
CALC_CHAMP(REAC_NODA, EPSI_NOEU, PARALLELISME_TEMPS='OUI')
```
- Pour simplifier la programmation<sup>8</sup> et ne pas chercher inutilement des gains mineurs, lorsque le nombre de pas de temps n'est pas un multiple du nombre de processus MPI, le reliquat de pas de temps est effectué par tous les processus. Et bien sûr, aucune communication n'est organisée entre ceux-ci.

1 Version mpi du code + menu d'Astk Options/mpi\_nbcpu>1.

2 Sur toutes les composantes du champs et à chaque pas de temps.

3 Sur uniquement des vecteurs et à chaque mpi\_nbcpu pas de temps.

4 Elle n'est donc plus active dans un CALC\_CHAMP suivant. Si nécessaire, elle devra être réactivée.

5 Appelées si nécessaire, en sous-main, par ces options de calculs.

6 Quelques dizaines de milliers de ddl par processus MPI pour le parallélisme en espace.

7 Evidemment, d'autant plus que le calcul unitaire d'un pas de temps est coûteux.

8 Donc la maintenance et l'évolutivité de l'opérateur.

- Dans certaines situations, le parallélisme en temps ne fonctionne pas. Suivant les cas, le calcul s'arrête ou émet une alarme : option non encore couverte (*CHAM\_UTIL*), contexte de calcul variant au cours du transitoire (*MODELE...*), calcul impossible en séquentiel, pas assez de pas de temps...