

Opérateur CALC_CHAMP

1 But

Créer ou compléter un `résultat` en calculant des champs par éléments 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

```
resu1 = CALC_CHAMP ( RESULTAT = resu, ... )
```

Table des Matières

1 But.....	1
2 Syntaxe.....	3
2.1 Opérandes RESULTAT/MODELE/CHAM_MATER/CARA_ELEM/EXCIT/ SOLVEUR.....	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 Opérandes pour les options mécaniques.....	9
2.4.1 Options de calcul des contraintes.....	9
2.4.2 Options de calcul des déformations.....	9
2.4.3 Options d'interpolation et d'extraction des variables internes.....	10
2.4.4 Options de calcul d'énergie.....	12
2.4.5 Options de calcul de critères.....	13
2.4.6 Autres options.....	15
2.4.7 Option de calcul des flux hydrauliques (éléments THM).....	15
2.5 Opérandes pour les options thermiques.....	16
2.5.1 Opérande THERMIQUE.....	16
2.6 Opérandes pour les options acoustiques.....	16
2.6.1 Opérande ACOUSTIQUE.....	16
2.7 Calcul d'un champ utilisateur.....	16
2.7.1 Opérande NOM_CHAM.....	17
2.7.2 Opérande CRITERE.....	17
2.7.3 Opérande FORMULE.....	17
2.7.4 Opérande NUME_CHAM_RESU.....	17
2.8 Opérande TITRE.....	17
3 Exemples.....	17
3.1 Calcul du flux pour un evol_ther.....	17
3.2 Contraintes aux points de GAUSS pour un calcul thermo-mécanique.....	17
3.3 Calcul des énergies potentielles pour un mode propre.....	18
3.4 Calcul de l'endommagement de Lemaître ou de Lemaître-Sermage.....	18
3.5 Calcul d'un champ utilisateur.....	18

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]
                        / COEF_MULT_C= cmc,    [C]
                        / FONC_MULT = fm,    [fonction]
                        / FONC_MULT_C= fmc,    [fonction_C]
                        ◇  PHAS_DEG = pd,    [R]
                        ◇  PUIS_PULS = n,    [I]
                        ◇  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]
        /  |  GROUP_NO = l_grno ,        [l_gr_noeud]
        |  NOEUD = l_noeu ,            [l_noeud]

    ◇  #  Sélection des numéro 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]
        ◇  |  P RECISION = / prec,
            / 1.0E-3,                [DEFAULT]
            |  CRITERE = / 'RELATIF',    [DEFAULT]
            / 'ABSOLU' ,

    #  options pour des résultats mécaniques linéaires

    ◇  RESULTAT = resu,

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

    ◇  CONTRAINTE =
        |  'SIGM_ELNO'
        |  'SIEF_NOEU'
        |  'SIEF_ELGA'
        |  'SIPO_ELNO'
        |  'SIPO_NOEU'
        |  'SICA_ELNO'
        |  'SICA_NOEU'
        |  'SIPM_ELNO'
        |  'EFGE_ELGA'
        |  'EFGE_ELNO'

    #  options de calcul des déformations
```

```
◇  DEFORMATION  =      |  'EPSI_ELNO'  
                        |  'EPSI_ELGA'  
                        |  'EPSG_ELGA'  
                        |  'EPSG_ELNO'  
                        |  'EPME_ELNO'  
                        |  'EPME_ELGA'  
                        |  'DEGE_ELNO'  
                        |  'EPTU_ELNO'  
                        |  'EPVC_ELNO'  
                        |  'EPVC_ELGA'  
                        |  'EPSI_NOEU'  
                        |  'EPSG_NOEU'  
                        |  'EPVC_NOEU'
```

options de calcul d'énergies

```
◇  ENERGIE  =      |  'EPOT_ELEM'  
                    |  'ECIN_ELEM'  
                    |  'ENEL_ELGA'  
                    |  'ENEL_ELNO'  
                    |  'ENEL_NOEU'  
                    |  'DISS_ELGA'  
                    |  'DISS_ELNO'  
                    |  'DISS_NOEU'
```

options de calcul de critères

```
◇  CRITERES  =      |  'SIEQ_ELGA'  
                    |  'EPEQ_ELNO'  
                    |  'EPEQ_ELGA'  
                    |  'EPMQ_ELNO'  
                    |  'EPMQ_ELGA'  
                    |  'ENDO_ELGA'  
                    |  'ENDO_ELNO'  
                    |  'ENDO_NOEU'  
                    |  'EPEQ_NOEU'
```

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 = | 'SIEF_ELNO'
| 'SIEF_NOEU'
| 'SITU_ELNO'
| 'SIPO_ELNO'
| 'SIPO_NOEU'
| 'EFGE_ELGA'
| 'EFGE_ELNO'

options de calcul des déformations

◇ DEFORMATION = | 'EPSI_ELNO'
| 'EPSI_ELGA'
| 'EPSG_ELNO'
| 'EPSG_ELGA'
| 'EPSG_NOEU'
| 'EPME_ELNO'
| 'EPME_ELGA'
| 'EPMG_ELNO'
| 'EPMG_ELGA'
| 'EPMG_NOEU'
| 'EPSP_ELNO'
| 'EPSP_ELGA'
| 'DEGE_ELNO'
| 'EPVC_ELNO'
| 'EPVC_ELGA'
| 'EPFD_ELNO'
| 'EPFD_ELGA'
| 'EPFP_ELNO'
| 'EPFP_ELGA'
| 'EPTU_ELNO'
| 'EPSI_NOEU'
| 'EPSP_NOEU'
| 'EPVC_NOEU'
| 'EPFD_NOEU'
| 'EPFP_NOEU'

options de calcul d'énergies

◇ ENERGIE = | 'ENEL_ELGA'
| 'ENEL_ELNO'
| 'ENEL_NOEU'
| 'DISS_ELGA'
| 'DISS_ELNO'

options de calcul de critères

◇ CRITERES = | 'SIEQ_ELGA'
| 'EPEQ_ELNO'
| 'EPEQ_ELGA'
| 'EPMQ_ELNO'
| 'EPMQ_ELGA'

```
| 'EPMQ_NOEU'  
| 'EPEQ_NOEU'  
| 'ENDO_ELGA'  
| 'ENDO_ELNO'  
| 'ENDO_NOEU'  
| 'PMPB_ELNO'  
| 'PMPB_ELGA'  
| 'PMPB_NOEU'  
  
# options d'interpolation et d'extraction des variables internes  
  
◇ VARI_INTERNE = | 'VARI_ELNO'  
| 'VARI_NOEU'  
| 'VATU_ELNO'  
| 'VACO_ELNO'  
  
| 'VAEX_ELGA'  
| 'VAEX_NOEU'  
| 'VAEX_ELNO'  
◆ NOM_VARI = (cf. [#2.4.3.])  
  
# options de calcul des flux hydrauliques (éléments THM)  
  
◇ HYDRAULIQUE = | 'FLHN_ELGA'  
  
# options thermiques  
  
◆ RESULTAT = resu, / [evol_ther]  
  
◇ THERMIQUE = | 'FLUX_ELNO'  
| 'FLUX_ELGA'  
| 'ERTH_ELEM'  
| 'ERTH_ELNO'  
| 'SOUR_ELGA'  
| 'DURT_ELNO'  
| 'HYDR_ELNO'  
  
# options acoustiques  
  
◆ RESULTAT = resu, / [acou_harmo]  
/ [mode_acou]  
  
◇ ACOUSTIQUE = | 'PRAC_ELNO'  
| 'INTE_ELNO'  
  
# options pour les forces et les réactions nodales généralisées  
  
◆ RESULTAT = resu,  
  
◇ FORCE = | 'FORC_NODA'  
| 'REAC_NODA'  
  
◇ TITRE = titre, [l_Kn]  
◇ INFO = / 1, [DEFAULT]  
/ 2,
```

calcul d'un champ utilisateur

```
◇ CHAM_UTIL = _F(  
  
    ♦ NOM_CHAM =      ncham,  
    ♦ /  CRITERE  =   |  'VMIS',  
                        |  'TRACE',  
    /  FORMULE    =   l_form,           [formule]  
    ♦ NUME_CHAM_RESU =   nume,           [I]  
  
    ),  
  
)
```

2.1 Opérandes RESULTAT/MODELE/CHAM_MATER/CARA_ELEM/EXCIT/ SOLVEUR

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, Il est optionnel car 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.

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
/ | GROUP_NO = l_grno
  | NOEUD    = l_noeu
```

Seules les mailles incluses dans `l_grma` et/ou `l_maille` seront traitées. De même, seuls les nœuds inclus dans `l_grno` et/ou `l_noeu` seront traités.

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 Opérandes pour les options mécaniques

2.4.1 Options de calcul des contraintes

| `'SIEF_ELGA'`

Calcul de l'état de contrainte par élément aux points d'intégration de l'élément (points de GAUSS ou points d'intégrations pour chaque couche des éléments de coque et chaque secteur des éléments tuyaux) à partir des déplacements (élasticité linéaire), voir [U2.01.05].

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

Calcul de l'état de contrainte aux nœuds (par élément) à partir de l'état de contrainte aux points de Gauss.

| `'EFGE_ELGA'`

Calcul des efforts généralisés (éléments de structure) aux points de Gauss à partir de l'état de contrainte aux points de Gauss.

| `'EFGE_ELNO'`

Calcul des efforts généralisés (éléments de structure) par élément aux nœuds.
Attention : le calcul n'est pas le même si la calcul est linéaire ou non-linéaire. En particulier, certaines composantes ne sont pas calculées (mises à zéro) en non-linéaire.

| `'EFGE_NOEU'`

Calcul des efforts généralisés (éléments de structure) aux nœuds.

Remarque : 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`.

2.4.2 Options de calcul des déformations

| `'DEGE_ELNO'`

Calcul des déformations généralisées par élément aux nœuds 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.

| `'EPFP_ELGA'`
| `'EPFP_ELNO'`
| `'EPFP_NOEU'`

Calcul (aux points de Gauss ou aux nœuds) des déformations de fluage propre associées au modèle `GRANGER_FP` ou au modèle `BETON_UMLV_FP` (pour les bétons).

| `'EPFD_ELGA'`
| `'EPFD_ELNO'`
| `'EPFD_NOEU'`

Calcul (aux points de Gauss ou aux nœuds) des déformations de dessiccation des bétons, pour le modèle BETON_UMLV_FP).

| 'EPME_ELGA'
| 'EPME_ELNO'

Calcul (aux points de Gauss ou aux nœuds) 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 (aux points de Gauss ou aux nœuds) 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'

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 par élément 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'

Déformations anélastiques aux points de Gauss. A partir du champ de déplacements (u) , de contraintes (σ) , de températures T , de déformations anélastiques éventuelles ε^a , et de variables internes, on calcule à chaque instant : $\varepsilon^p = \varepsilon(u) - A^{-1} \sigma - \varepsilon^{th}(T) - \varepsilon^a - \varepsilon^{fl}$ où ε^{fl} est la déformation de fluage propre de Granger.

| 'EPSP_ELNO'
| 'EPSP_NOEU'

Déformations anélastiques obtenues par extrapolation aux nœuds des valeurs aux points de Gauss (cf. EPSP_ELGA).

| 'EPVC_ELGA'
| 'EPVC_ELNO'
| 'EPVC_NOEU'

Calcul des déformations (aux points de Gauss ou aux nœuds) liées aux variables de commande. Pour l'instant ne sont définies que les composantes suivantes :

- déformations thermiques : EP_{THER_L}, EP_{THER_T}, EP_{THER_N} telle 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 α_i le coefficient de dilatation ;
- 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.
- Déformation liée à la pression de fluide (pour la THM avec une résolution par chaînage) : EP_{POTOT} telle que : $\varepsilon^{pot} = \frac{b}{3K} p_{tot}$, p_{tot} est la variable de commande pression totale de fluide, b est le coefficient de Biot, K est le module d'élasticité

2.4.3 Options d'extraction des variables internes

```
| 'VARI_ELNO'  
| 'VARI_NOEU'
```

Calcul des variables internes aux nœuds des éléments à partir des points de Gauss.

Le nombre et le type de ces variables internes sont spécifiques à chaque modèle de comportement (cf. doc U4 de STAT_NON_LINE par exemple).

```
| 'VATU_ELNO'
```

Calcul des variables internes **dans une couche** et pour un secteur angulaire d'éléments tuyau (mots clés REPE_COQUE / NUME_COUCHE, NIVE_COUCHE et ANGLE).

```
| 'VACO_ELNO'
```

Calcul des variables internes dans une couche d'éléments coque définie par NUME_COUCHE et NIVE_COUCHE.

```
| 'VAEX_NOEU'  
| 'VAEX_ELNO'  
| 'VAEX_ELGA'
```

Extraction des **variables internes en THM uniquement** (respectivement aux nœuds par éléments et aux points de Gauss).

Pour pouvoir post-traiter les variables internes en THM de façon plus conviviale, des champs ont été créés. Le principe de ces champs est d'extraire du champ VARI_ELGA (ou VARI_ELNO pour le `cham_elem` aux nœuds) la variable interne qui nous intéresse via un mot clé plus parlant que $V1$, $V2$, ...

```
◇ NOM_VARI = / nom_vari, [TXM]
```

Le nom des nouveaux champs est VAEX_ELGA et VAEX_ELNO pour les `cham_elem` et VAEX_NOEU pour le `cham_no`.

En tant que post traitement ces champs sont calculés par CALC_CHAMP. La syntaxe à utiliser est la suivante :

•pour un `cham_elem`

```
GAMP=CALC_CHAMP (RESULTAT=U1,  
VARI_INTERNE= ('VAEX_ELNO') ,
```

```
NOM_VARI='GAMP'); -----> nouveau mot clé pour indiquer quelle  
                             variable on souhaite extraire via un  
                             nom codé
```

•pour un `cham_no`

```
GAMP=CALC_NO(reuse=GAMP,  
             RESULTAT=GAMP,  
             VARI_INTERNE=('VAEX_NOEU'));
```

Puisqu'il s'agit juste d'extraire une (et une seule!!) variable interne, les `cham_elem` correspondants doivent avoir été calculés au préalable.

La liste des différents noms symboliques des variables internes est :

"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'écrouissage cinématique
"X22"	: Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X33"	: Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X12"	: Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X13"	: Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X23"	: Composantes du tenseur d'écrouissage 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

Remarque :

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()`.

2.4.4 Options de calcul d'énergie

	'ECIN_ELEM'
	Énergie cinétique d'un élément.
	'ENEL_ELGA'

```
'ENEL_ELNO'  
'ENEL_NOEU'
```

Calcul de la densité d'énergie élastique aux points de Gauss ou aux nœuds de chaque élément.

Cette option diffère de l'option EPOT_ELEM qui calcule l'énergie de déformation élastique intégrée dans chaque élément, cette énergie étant un scalaire pour un élément donné. Ici, on calcule la densité d'énergie élastique qui s'écrit :

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

Ce calcul s'appuie sur le champ de contraintes aux points de Gauss, obtenu par SIEF_ELGA ou SIEF_ELGA.

```
| 'DISS_ELGA'  
  'DISS_ELNO'  
  'DISS_NOEU'
```

Calcul de l'énergie de dissipation aux points de Gauss ou aux nœuds de chaque élément. Valable uniquement pour les éléments DKTG et la loi GLRC_DM. Leurs expressions sont données dans la doc R de la loi de comportement.

```
| 'EPOT_ELEM'
```

Calcul de l'énergie potentielle de déformation intégrée sur un élément, à partir des déplacements U et des températures T

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

$$EPOT = \frac{1}{2} \int_{\text{element}} \varepsilon(U) A \varepsilon(U) dv - \int_{\text{element}} \varepsilon(U) A \varepsilon^{th}(U) dv + \frac{1}{2} \int_{\text{element}} \varepsilon^{th}(U) A \varepsilon^{th}(U) dv$$

- pour les éléments de poutres :

$$EPOT = \frac{1}{2} U^T K_e U - U^T B^T A \varepsilon^{th} + \frac{1}{2} \varepsilon^{th} A \varepsilon^{th}$$

- et pour les éléments de plaques et coques :

$$EPOT = \frac{1}{2} U^T K_e U - U^T B^T A \varepsilon^{th}$$

2.4.5 Options de calcul de critères

```
| 'ENDO_ELGA'
```

Calcul du dommage d aux points de Gauss à partir du tenseur des contraintes et de la déformation plastique cumulée p . La cinétique d'endommagement est donnée par la loi de Lemaître-Sermage :

$$\dot{d} = \left[\frac{Y}{S} \right]^s \dot{p} \text{ si } p \geq p_{\text{seuil}}$$

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).

Calcul systématique du taux de triaxialité α et de la contrainte équivalente d'endommagement σ^* :

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

$$\text{TRIAX} : \alpha = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}}$$

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

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

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

Calcul du dommage total par cumul linéaire

$$\text{D_CUMULE} : D = \sum_i D_i :$$

TRIAX valeur du taux de triaxialité
SI_ENDO valeur de la contrainte d'endommagement de Lemaître-Sermage
COENDO valeur de la contrainte d'endommagement de Lemaître-Sermage normalisée
DOM_LEM valeur du dommage de Lemaître-Sermage
D_CUMULE valeur du dommage de Lemaître-Sermage cumulé

| 'ENDO_ELNO'
| 'ENDO_NOEU'

Endommagement de Lemaitre-Sermage obtenues par extrapolation aux nœuds des valeurs aux points de Gauss (cf. ENDO_ELGA).

| 'EPEQ_ELGA'
| 'EPMQ_ELGA'

Déformations "équivalentes" aux points de Gauss (calculées à partir des champs EPSI_ELGA, ou EPME_ELGA) :

$$\text{INVA_2} : \text{déformation équivalente de Von Mises} : \text{INVA_2} = \sqrt{\frac{2}{3} \text{dev}(\varepsilon)_{ij} \text{dev}(\varepsilon)_{ji}}$$

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

INVA_2SG : déformation équivalente de Von Mises signée par la trace de ε

PRIN_1, PRIN_2, PRIN_3 : déformations principales

Pour les éléments TUYAU, les composantes calculés sont INVA_2 et INVA_2SG

| 'SIEQ_ELGA'

Contraintes "équivalentes" aux points de Gauss :

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

VMIS_SG : contrainte de von Mises signée par la trace de σ

TRESCA : contrainte de Tresca

PRIN_1, PRIN_2, PRIN_3 : contraintes principales

VECT_1_X, VECT_1_Y, ..., VECT_3_Z : contraintes, déformations et directions principales, uniquement pour les modélisations ci-dessous :

- 3D, 3D_SI, 3D_GRAD_VARI
- SHB8 seulement pour les contraintes
- AXIS, AXIS_SI, AXIS_GRAD_VARI
- D_PLAN, D_PLAN_SI, D_PLAN_GRAD_EPSI, D_PLAN_GRAD_VARI
- C_PLAN, C_PLAN_SI, C_PLAN_GRAD_EPSI, C_PLAN_GRAD_VARI

Pour les éléments TUYAU, les composantes calculés sont VMIS et VMIS_SG et leur version signée *_SG.

```
| 'EPEQ_ELNO'  
| 'EPEQ_NOEU'  
| 'EPMQ_ELNO'  
| 'EPMQ_NOEU'
```

Déformations "équivalentes" aux nœuds (calculées à partir des champs EPSI_ELNO, ou EPME_ELNO) :

INVA_2 : déformation équivalente de Von Mises

INVA_2SG : déformation équivalente de Von Mises signé par la trace de ε

PRIN_1, PRIN_2, PRIN_3 : déformations principales

On note que les déformations équivalentes obtenues à partir de EPSI_ELNO et EPME_ELNO 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.

```
| 'PMPB_ELGA'  
| 'PMPB_ELNO'  
| 'PMPB_NOEU'
```

Calcul de critères du RCC-M G3000 pour les éléments de poutres POU_D_E et POU_D_T.
Deux quantités sont calculées : PM et PMPB.

$$PM = \left| \frac{N}{S} \right|$$
$$PMPB = \left| \frac{N}{S} \right| + \frac{M \cdot R}{I} \quad \text{avec} \quad M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$$

Ceci correspond à la valeur maximum de SIXX dans une section circulaire [R3.08.01].

PMPB_ELGA : valeurs de PM et PMPB aux points de Gauss, calculées à partir de SIEF_ELGA.

PMPB_ELNO : valeurs de PM et PMPB aux nœuds, calculées à partir de SIEF_ELNO.

En toute rigueur, ces critères sont à appliquer aux contraintes primaires. Cette distinction est à faire par l'utilisateur.

2.4.6 Autres options

```
| 'VARC_ELGA'
```

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

7 variables sont systématiquement calculées :

TEMP, HYDR, SECH, CORR, IRRA, PTOT, DIVU, NEUT1, NEUT2

Remarque : Les variables qui n'ont pas été définies sont initialisées à la valeur R8VIDE () (nombre réel très grand de l'ordre de 1.D308)

2.4.7 Option de calcul des flux hydrauliques (éléments THM)

```
| 'FLHN_ELGA'
```

Calcul des flux hydrauliques $\Phi_{ij} = \mathbf{M}_{ij} \cdot \mathbf{v}$ aux points de Gauss sur les éléments de bord (2D ou 3D) à partir du vecteur flux aux nœuds (l'option 'SIEF_NOEU' doit avoir été calculée au préalable).

Où \mathbf{M}_{ij} est le vecteur flux hydraulique du composant ij . [U2.04.05]

L'intégrale des flux sur une surface est effectuée dans POST_ELEM par intégration de ce champ.

2.5 Opérandes pour les options thermiques

2.5.1 Opérande THERMIQUE

| 'FLUX_ELGA'

Calcul des flux de chaleur aux points d'intégration de Gauss à partir de la température.

| 'FLUX_ELNO'

| 'FLUX_NOEU'

Calcul des flux de chaleur aux nœuds à partir de la température.

| 'ERTH_ELEM',

| 'ERTH_ELNO'

Estimateurs d'erreur en résidu en thermique. [R4.10.03]. Il faut préalablement effectuer dans CALC_ELEM le calcul des flux aux nœuds via FLUX_ELNO.

Le mot-cle INFO procure tous les affichages intermédiaires du calculs (connectivités, normales, diamètres, valeurs des champs, jacobien).

L'option 'ERTH_ELNO' permet de ramener le champ par élément ERTH_ELEM à un champ aux nœuds par élément, ce qui permet de faire des relevés de valeurs ou des impressions / visualisations.

| 'SOUR_ELGA'

Calcul d'une source de chaleur (pouvant être introduite dans un calcul thermique via le mot clé SOURCE = (SOUR_CALCULEE : ...) de la commande AFFE_CHAR_THER [U4.44.02].

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.

| 'DURT_ELNO'

| 'DURT_NOEU'

Calcul de dureté aux nœuds à partir des phases métallurgiques (cf. [R4.04.01]).

| 'HYDR_ELNO'

Calcul de l'hydratation aux nœuds à partir de l'hydratation aux points de Gauss, calculée par THER_NON_LINE pour la modélisation du béton [R7.01.12].

2.6 Opérandes pour les options acoustiques

2.6.1 Opérande ACOUSTIQUE

| 'PRAC_ELNO'

| 'PRAC_NOEU'

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

| 'INTE_ELNO'

| 'INTE_NOEU'

Calcul de l'intensité acoustique active et réactive aux nœuds.
Les définitions se trouvent dans [R4.02.01].

2.7 Opérandes FORCES

| 'FORC_NODA'

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

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 σ_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.

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

où \mathbf{B} est la matrice reliant les déformations du 1^{er} 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 *radian*. Si on veut l'intégrale de l'effort surfacique sur tout le disque il faut donc multiplier par 2π .

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.

La présence du champ de nom symbolique 'SIEF_ELGA' est obligatoire dans le concept résultat resu, de même que le nom du modèle sous-jacent à ce champ.

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 Δt , on a :

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

Dans FORC_NODA :

-le degré de liberté PRE1 est associé le flux d'eau $-\Delta t \int_{\Omega} M_{vp} + M_w^- \nabla p^* d\Omega$

-le degré de liberté PRE2 est associé le flux du composant gazeux $-\Delta t \int_{\Omega} M_{ad} + M_{as}^- \nabla p^* d\Omega$

-le degré de liberté TEMP est associé le flux thermique $-\Delta t \int_{\Omega} q^- \nabla T^* d\Omega$

avec q le flux thermique et M_w , M_{vp} , M_{as} et 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'

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

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

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

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

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 :

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

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

A noter que le changement 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 :

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

où \mathbf{M} est la matrice de masse
 ω 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 calculs dynamiques transitoires non-linéaires (DYNA_NON_LINE) l'expression est:

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

où M est la matrice de masse
 \ddot{u} le champ d'accélération

Remarque:

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.
Toutefois le fait de négliger l'apport de l'amortissement en dynamique peut créer un léger écart par rapport au résultat exact.

Voir également les exemples [§3.9].

Remarque:

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 (voir exemples [§3.9]).

2.8 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 (`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.

2.8.1 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`.

2.8.2 Opérande `CRITERE`

Demande le calcul d'un critère prédéfini. Les critères sont (le paragraphe 2.4.5 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.

2.8.3 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`.

2.8.4 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..

2.9 Opérande TITRE

◇ TITRE = titre

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

3 Exemples

3.1 Calcul du flux pour un evol_ther

```
evoth = CALC_CHAMP (reuse      = evoth,  
                    RESULTAT   = evoth,  
                    TOUT_ORDRE = 'OUI',  
                    THERMIQUE  = ('FLUX_ELNO') )
```

3.2 Contraintes aux points de GAUSS pour un calcul thermo-mécanique

```
evolas = CALC_CHAMP ( reuse      = evolas,  
                     RESULTAT   = evolas,  
                     TOUT_ORDRE = 'OUI',  
                     CONTRAINTE = 'SIEF_ELGA' )
```

3.3 Calcul des énergies potentielles pour un mode propre

```
mode = CALC_CHAMP ( reuse      = mode,  
                   RESULTAT   = mode,  
                   NUME_MODE  = 3,  
                   ENERGIE    = 'EPOT_ELEM' )
```

3.4 Calcul de l'endommagement de Lemaître ou de Lemaître-Sermage

```
evolas = CALC_CHAMP( reuse      = evolas,  
                    CRITERES   = ( 'ENDO_ELGA',  
                                   'ENDO_ELNO',  
                                   'ENDO_NOEU' ),  
                    RESULTAT   = evolas, );
```

3.5 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,  
  ), )
```