

**Manuel d'Utilisation**  
**Fascicule U4.8- : Post-traitement et analyses dédiées**  
**Document U4.84.01**

## Opérateur COMB\_SISM\_MODAL

### 1 But

Calculer une réponse dynamique à des mouvements imposés uniques ou multiples.

Ces sollicitations sont représentées par des spectres de réponse d'oscillateur représentant un séisme ou un choc. Ces spectres d'oscillateur peuvent être déterminés à partir d'un accélérogramme du signal sismique (signal réel ou signal synthétique) par la commande `CALC_FONCTION` avec le mot clé facteur `SPEC_OSCI` [U4.32.04].

L'opérateur `COMB_SISM_MODAL` permet de déterminer, en tout point de la structure, les composantes maximales de déplacement relatif, de pseudo-vitesse relative, de pseudo-accélération absolue, les efforts généralisés maximaux par élément et les réactions maximales aux appuis.

Ces maximums de réponse sont calculés à partir de la réponse maximale d'un oscillateur simple, associé à chaque mode propre réel pris en considération. Plusieurs règles de recombinaison des contributions de chaque mode propre et des contributions dans chaque direction sont disponibles.

Produit un concept de type `mode_stat`.

## 2 Syntaxe

```
R [mode_stat] = COMB_SISM_MODAL
```

```
(
  ◆ MODE_MECA = mode [mode_meca]
  ◇ / TOUT_ORDRE = 'OUI' [DEFAULT]
    / NUME_ORDRE = l_ordre [l_I]
    / LIST_ORDRE = lordre [listis]
    / NUME_MODE = l_mode [l_I]
    / / FREQ = l_freq [l_R]
      / LIST_FREQ = lfrequ8 [listr8]
        ◇ | PRECISION = / 1.D-3 [DEFAULT]
          / prec [R]
            | CRITERE = / 'RELATIF' [DEFAULT]
              / 'ABSOLU'

  ◇ MODE_CORR = acce [mode_stat_acce]

  ◆ / AMOR_REDUIT = amor [l_R]
    / LIST_AMOR = lamor [listr8]
    / AMOR_GENE = amogene [matr_asse_gene_R]

  ◆ MASS_INER = mass_iner [tabl_mass_iner]

  ◆ EXCIT =_F( ◆ / MONO_APPUI = / 'OUI'
               / NOEUD = lno [l_noeud]
               / GROUP_NO = lgrno [l_group_no]

               ◆ / ◆ AXE = (c1, c2, c3)[l_R]
                 ◆ SPEC_OSCI = spec [fonction]
                 ◇ ECHELLE = echel [R]

               / ◆ TRI_AXE = (p1, p2, p3)[l_R]
                 ◆ SPEC_OSCI = spec [fonction]
                 ◇ ECHELLE = echel [R]

               / ◆ TRI_SPEC = 'OUI'
                 ◆ SPEC_OSCI = (spe1, spe2, spe3)[l_fonction]
                 ◇ ECHELLE = (ech1, ech2, ech3) [l_R]

               ◇ NATURE = / 'ACCE' [DEFAULT]
                         / 'VITE'
                         / 'DEPL'

               )

  ◇ CORR_FREQ = / 'OUI' [DEFAULT]
                / 'NON'

  ◆ COMB_MODE =_F( ◆ / TYPE = / 'SRSS'
                   / 'CQC'
                   / 'DPC'
                   / 'ABS'
                   / 'DSC'

                   ◇ DUREE = s [R]

                   )

  ◇ COMB_DIRECTION =_F( ◆ / TYPE = / 'QUAD'
                        / 'NEWMARK'

                        )
```

Titre :           Opérateur *COMB\_SISM\_MODAL*  
Auteur(s) :    **Y. PONS, J. PIGAT, L. VIVAN**

Date :           06/02/03  
Clé :    *U4.84.01-E*   Page :    3/22

```

◇ COMB_MULT_APPUI =_F(
    ◆ / TOUT = 'OUI'
    / NOEUD = lno [l_noeud]
    / GROUP_NO = lgrno[l_group_no]
    ◆ / TYPE = / 'QUAD'
    / 'LINE'
    / 'ABS'
    ◆ / TYPE_COMBI = / 'QUAD'
    / 'LINE'
    / 'ABS'
    )
◇ DEPL_MULT_APPUI =_F(
    ◆ NOM_CAS = nomcas
    ◆ NUME_CAS = numcas
    ◇ NOEUD_REFE = noeud [noeud]
    ◇ MODE_STAT = stat [mode_stat_depl]
    ◆ / NOEUD = lno [l_noeud]
    / GROUP_NO = lgrno[l_group_no]
    ◆ | DX = dx [R]
    | DY = dy [R]
    | DZ = dz [R]
    )
◇ COMB_DEPL_APPUI =_F(
    ◆ / TOUT = 'OUI'
    / LIST_CAS = liste [l_numel]
    ◆ / TYPE = / 'QUAD'
    / 'LINE'
    / 'ABS'
    ◆ / TYPE_COMBI = / 'QUAD'
    / 'LINE'
    / 'ABS'
    )
    ◆ OPTION = | 'DEPL'
    | 'VITE'
    | 'ACCE_ABSOLU'
    | 'SIGM_ELNO_DEPL'
    | 'SIEF_ELGA_DEPL'
    | 'SIPO_ELNO_DEPL'
    | 'EFGE_ELNO_DEPL'
    | 'EFGE_ELNO_CART'
    | 'REAC_NODA'
    | 'FORC_NODA'

◇ TITRE = tit [l_Kn]
◇ INFO = / 1 [DEFAULT]
/ 2
◇ IMPRESSION =_F( / TOUT = 'OUI' [DEFAULT]
/ NIVEAU = | 'SPEC_OSCI'
| 'MASS_EFFE'
| 'MAXI_GENE'
    )
);

```

## 3 Opérandes

### 3.1 Définition des modes propres de la structure

#### 3.1.1 Opérande **MODE\_MECA**

- ◆ **MODE\_MECA** = mode

Nom du concept de type `mode_meca` produit par un des opérateurs d'analyse modale `MODE_ITER_SIMULT` [U4.52.03] ou `MODE_ITER_INV` [U4.52.04].

#### 3.1.2 Opérandes **TOUT\_ORDRE / NUME\_ORDRE / NUME\_MODE / LIST\_ORDRE**

/ **TOUT\_ORDRE** = 'OUI'

Valeur par défaut qui permet d'extraire tous les modes propres disponibles dans le concept `mode`.

/ **NUME\_ORDRE** = `l_ordre`

/ **NUME\_MODE** = `l_mode`

Extraction des modes propres définis par une liste `l_ordre` de numéros d'ordres (**NUME\_ORDRE**) ou une liste `l_mode` de numéros de modes (**NUME\_MODE**).

/ **LIST\_ORDRE** = `l_ordre`

#### 3.1.3 Opérande **FREQ / LIST\_FREQ / PRECISION / CRITERE**

/ **FREQ** = `l_freq`

Permet d'extraire les modes propres correspondant à une liste de fréquences `l_freq`.

/ **LIST\_FREQ** = `lfreqr8`

Permet d'extraire les modes propres correspondant à une liste de fréquences `lfreqr8`, définie par l'opérateur `DEFI_LIST_REEL` [U4.34.01] (`lfreqr8` est donc un concept de type `listr8`).

◇ | **PRECISION** = `prec`  
| **CRITERE** =

Ces opérandes permettent d'indiquer que l'on recherche tous les modes propres dont la fréquence se trouve dans l'intervalle "`inst ± prec`". Par défaut `prec = 1.0D-3`.

Suivant le **CRITERE** =

'RELATIF' l'intervalle de recherche est :

[`inst (1 - prec)`, `inst (1 + prec)`]

'ABSOLU' l'intervalle de recherche est :

[`inst - prec`, `inst + prec`].

### 3.2 Définition des amortissements modaux

Trois possibilités existent pour définir les amortissements modaux : une liste d'amortissements réduits fournie par l'utilisateur sous forme de liste de réels (`l_r`) ou d'un concept de type `listr8` construit par l'opérateur `DEFI_LIST_REEL` [U4.34.01] ou une matrice d'amortissement généralisée (matrice d'amortissement projetée sur la base des modes propres réels).

## 3.2.1 Opérande AMOR\_REDUIT

/ AMOR\_REDUIT = amor

Cet opérande permet de fournir la liste des amortissements réduits sous forme d'une liste de réels (*l\_R*). Si le nombre de coefficients fournis est inférieur aux nombres de modes propres pris en compte, le dernier coefficient est attribué au mode correspondant et aux modes suivants.

## 3.2.2 Opérande LIST\_AMOR

/ LIST\_AMOR = lamor

Cet opérande permet de fournir la liste des amortissements réduits sous forme d'un concept de type *listr8*. Si le nombre d'amortissements réduits est inférieur au nombre de modes propres pris en compte, le dernier coefficient est affecté aux modes suivants.

### Exemple :

TOUT\_ORDRE = 'OUI' LIST\_AMOR = ('0.01', '0.02')

premier mode  $\xi = 0.01$  et pour tous les autres modes  $\xi = 0.02$

## 3.2.3 Opérande AMOR\_GENE

/ AMOR\_GENE = amogene

On donne le nom de la matrice d'amortissement généralisé *amogene* produite par l'opérateur PROJ\_MATR\_BASE [U4.63.12] ou MACRO\_PROJ\_BASE [U4.63.11].

## 3.3 Opérande MASS\_INER

Pour vérifier le critère de cumul des masses effectives unitaires des modes propres pris en compte dans chaque direction, il est nécessaire de connaître la masse totale de la structure.

Celle-ci est calculée par la commande POST\_ELEM avec le mot clé MASS\_INER [U4.81.22]. L'opérande MASS\_INER permet de fournir le nom du concept produit par cette commande.

## 3.4 Description de l'excitation : mot clé EXCIT

L'excitation sismique est définie par un ou plusieurs spectres d'oscillateurs. Ceux-ci sont calculés au préalable par la commande CALC\_FONCTION [U4.32.04] ou lus sur un fichier par la commande LIRE\_FONCTION [U4.32.02] avec le format 'SEISME'. Dans les deux cas le concept produit est de type *fonction* à deux variables (*nappe*).

On utilise pour cela le mot clé *facteur*

◆ EXCIT

et éventuellement l'opérande CORR\_FREQ.

### 3.4.1 Opérandes MONO\_APPUI / NOEUD / GROUP\_NO

Deux situations sont possibles :

- la structure est étudiée avec le même mouvement d'entraînement à tous les appuis : on utilise alors l'opérande MONO\_APPUI = 'OUI'  
Le mot clé facteur EXCIT ne doit apparaître qu'une seule fois dans ce cas.
- la structure est étudiée avec plusieurs mouvements d'entraînement différents (excitation multi appuis) : on précise à chaque occurrence du mot clé facteur les nœuds ou groupes de nœuds concernés par l'excitation décrite

```
/ NOEUD      = lno  
/ GROUP_NO   = lgrno
```

### 3.4.2 Excitation suivant un axe

```
/ ♦ AXE      = (c1, c2, c3)  
♦ SPEC_OSCI = spec  
◇ ECHELLE   = echel
```

Dans ce cas on fournit :

- les cosinus directeurs (c1 c2 c3) de l'axe d'excitation dans le repère GLOBAL de définition du maillage : les coefficients c1, c2, c3 sont renormés par la commande,
- l'opérande SPEC\_OSCI attend un seul spectre d'oscillateur où spec est le nom de la nappe à utiliser,
- l'opérande ECHELLE permet de définir un facteur d'échelle echel à appliquer à tous les points du spectre spec.

#### Exemple :

Pour une excitation à 45° par rapport au repère GLOBAL, un spectre de sol sol\_0\_1 calé à 0.1g et un facteur d'échelle permettant de simuler un spectre calé à 0.25g :

```
AXE=( '1.', '1.', '0.' ),  
SPEC_OSCI=sol_0_1,  
ECHELLE=2.5,
```

### 3.4.3 Excitation triaxiale avec un seul spectre

```
/ ♦ TRI_AXE   = ( p1, p2, p3 )  
♦ SPEC_OSCI = spec  
◇ ECHELLE   = echel
```

Dans ce cas on fournit :

- les coefficients de pondération (p1 p2 p3) à appliquer au spectre d'oscillateur pour chacune des directions X, Y et Z,
- l'opérande SPEC\_OSCI attend un seul spectre d'oscillateur où spec est le nom de la nappe à utiliser,
- l'opérande ECHELLE permet de définir un facteur d'échelle echel à appliquer à tous les points du spectre spec, indépendamment des coefficients de pondération de direction.

#### Exemple :

Pour une excitation avec une pondération de 1. en X et en Y (plan horizontal) et 0.66 en Z (vertical), un spectre de sol calé à 0.1g et un facteur d'échelle permettant de simuler un spectre calé à 0.25g :

```
TRI_AXE=( '1.', '1.', '0.66' ),  
SPEC_OSCI=sol_0_1,  
ECHELLE=2.5,
```

### 3.4.4 Excitation triaxiale avec trois spectres différents

```

/  ♦ TRI_SPEC = 'OUI'
    ♦ SPEC_OSCI = ( spe1, spe2, spe3 )
    ♦ ECHELLE = ( ech1, ech2, ech3 )

```

Dans ce cas on fournit :

- l'opérande TRI\_SPEC: 'OUI',
- l'opérande SPEC\_OSCI attend trois spectres d'oscillateurs où (spe1 spe2 spe3) est la liste des noms des nappes à utiliser,
- l'opérande ECHELLE permet de définir trois facteurs d'échelle (ech1 ech2 ech3) à appliquer indépendamment à tous les points de chacun des spectres .

#### Exemple :

Pour une excitation spe1 en X, spe2 en Y et spe3 en Z, avec trois facteurs d'échelle différents :

```

TRI_SPEC='OUI' ,
SPEC_OSCI=( spe1 spe2 spe3 ) ,
ECHELLE=( ech1 ech2 ech3 ) ,

```

### 3.4.5 Opérande NATURE

```

♦ NATURE

```

Cet opérande permet de préciser la grandeur du spectre d'oscillateur. Par défaut on utilise un spectre d'accélération 'ACCE'. Il est possible d'utiliser plus rarement d'autres grandeurs : vitesse 'VITE' ou déplacement 'DEPL'.

### 3.4.6 Opérande CORR\_FREQ

```

♦ CORR_FREQ

```

Pour calculer les composantes de réponse en vitesse ou en accélération à partir d'un spectre d'oscillateur de la grandeur déplacement (NATURE = 'DEPL') on est conduit à multiplier chaque valeur une ou deux fois par  $\omega_r$  pulsation du mode propre réel (oscillateur non amorti). En toute rigueur l'oscillateur  $r$  est amorti et sa pulsation propre est  $\omega_r \sqrt{1 - \xi^2}$  et  $\omega_r$  n'est que la pseudo-pulsation propre. Par défaut on obtient donc :

$$vite_{max} = \omega_r \, depl_{lu} = pseudo - vitesse$$

$$acce_{max} = \omega_r^2 \, depl_{lu} = pseudo - accélération$$

L'opérande CORR\_FREQ : 'OUI' permet de corriger ces valeurs pour prendre en compte l'amortissement du mode propre :

$$vite_{max} = \omega_r \sqrt{1 - \xi^2} \, depl_{lu} = vitesse$$

$$acce_{max} = \omega_r^2 (1 - \xi^2) \, depl_{lu} = accélération$$

Si on fournit un spectre de réponse en vitesse (NATURE = 'VITE') l'opérande CORR\_FREQ sera nécessaire pour corriger  $depl_{max}$  et  $acce_{max}$  si nécessaire. De même pour un spectre de réponse en accélération (NATURE = 'ACCE') pour corriger  $depl_{max}$  et  $vite_{max}$ .

Dans tous les cas, on veillera à ne pas utiliser comme donnée SPEC un spectre de pseudo-grandeur.

### 3.5 Règles de combinaison

Pour évaluer un majorant de la réponse de la structure, on raisonne grandeur par grandeur (déplacement, vitesse ou accélération, efforts internes, contraintes) à partir des valeurs modales associées aux modes propres pris en considération. Pour chaque grandeur, on traitera **indépendamment** chaque degré de liberté (champs aux nœuds de déplacement, vitesse ou accélération), ou chaque composante de torseur (efforts internes) ou de contrainte. C'est ce que nous appelons la réponse  $R$  dans l'énoncé des règles de combinaison.

Plusieurs niveaux de combinaisons sont nécessaires :

- combinaison des modes propres,
- correction statique par pseudo mode,
- combinaison suivant les directions de séisme.

Dans le cas d'une analyse multi-appuis, les règles de combinaison sont modifiées pour tenir compte des différentes excitations appliquées à des groupes d'appuis. Il est également possible de calculer séparément les composantes primaires et secondaires de la réponse.

### 3.6 Règles de combinaison pour une excitation mono-appui

La réponse **totale** de la structure  $R$  est obtenue par **combinaison des réponses directionnelles**  $R_x$  où  $X$  représente une des directions du repère GLOBAL de définition du maillage  $(X, Y, Z)$  ou une direction particulière (cf. opérande AXE). La réponse directionnelle est donnée par :

$$R_X = \sqrt{R_d^2 + R_t^2 + R_e^2}$$

- $R_d$  réponse combinée des oscillateurs modaux établie par le mot clé COMB\_MODE [§ 3.6.1]
- $R_t$  représente la correction des effets statiques des modes négligés (pseudo mode) [§ 3.6.2]
- $R_e$  contribution du mouvement d'entraînement ( $R_e = 0$  en mono appui)

La règle de combinaison des réponses directionnelles est définie par le mot clé COMB\_DIRECTION [§ 3.6.3].

#### 3.6.1 Combinaison des modes propres : mot clé COMB\_MODE

◆ COMB\_MODE

La réponse de la structure  $R_d$ , **dans une direction de séisme**, est obtenue par une des combinaisons possibles (définie par l'opérande TYPE) des contributions de chacun des modes propres pris en compte. Chaque mode propre est considéré comme un oscillateur indépendant de réponse  $R_r$  défini par  $(\omega_r, \xi_r)$ . La réponse est lue par interpolation dans le spectre d'oscillateur du signal d'excitation dans cette direction.



Pour une excitation mono appui la réponse  $R_r$  de l'oscillateur  $r$  est donnée par :

$$R_r = \frac{P_r}{\omega_r^2} S_r \Phi_r$$

- $\phi_r$  grandeur modale (déplacement, effort généralisé, réaction) associée au mode propre d'indice  $r$
- $P_r$  facteur de participation modale associé au mode  $r$  dans la direction étudiée
- $S_r$  valeur du spectre de réponse, par exemple en pseudo accélération, pour l'oscillateur  $r$

Plusieurs règles de combinaison des modes propres sont disponibles. Elles sont choisies par l'opérande TYPE.

### 3.6.1.1 Combinaison quadratique TYPE = 'SRSS'

Cette combinaison (Square Root of Sum of Squares) correspond à l'hypothèse d'indépendance stricte des oscillateurs associés à chaque mode propre :

$$R_d = \sqrt{\sum_{r=1}^{nmod} R_r^2}$$

Notons que cette règle de combinaison, bien que très couramment utilisée, peut être mal adaptée quand l'hypothèse d'indépendance n'est pas vérifiée pour des modes propres voisins ou avec amortissement important.

### 3.6.1.2 Combinaison quadratique complète TYPE = 'CQC'

La combinaison quadratique (établie par DER KIUREGHIAN [bib1]) apporte une correction à la règle précédente en introduisant des coefficients de corrélation dépendant des amortissements et des distances entre modes propres voisins (cf. [R4.05.03]) :

$$R_d = \sqrt{\sum_{r_1} \sum_{r_2} \rho_{r_1 r_2} R_{r_1} R_{r_2}}$$

avec le coefficient de corrélation :

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{\xi_i \xi_j} \omega_i \omega_j (\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j) \omega_i \omega_j}{(\omega_i^2 - \omega_j^2)^2 + 4\xi_i \xi_j \omega_i \omega_j (\omega_i^2 + \omega_j^2) + 4(\xi_i^2 + \xi_j^2) \omega_i^2 \omega_j^2}$$

### 3.6.1.3 Somme des valeurs absolues TYPE = 'ABS'

Cette combinaison correspond à une hypothèse de dépendance complète des oscillateurs associés à chaque mode propre :

$$R_d = \sum_{r=1}^{nmod} |R_r|$$

Notons que cette règle de combinaison est à déconseiller, car elle est trop fortement conservatrice et conduit à un surdimensionnement systématique.

**3.6.1.4 Combinaison avec règle des 10% TYPE = 'DPC'**

Les modes voisins (dont les fréquences diffèrent de moins de 10%) sont d'abord combinés par sommation des valeurs absolues. Les valeurs résultant de cette première combinaison sont ensuite combinées quadratiquement. Cette méthode a été proposée par le règlement américain U.S. Nuclear Regulatory Commission (Regulatory Guide 1.92 - Février 1976) pour atténuer le conservatisme de la méthode précédente. Elle reste en défaut pour des structures avec un spectre de fréquences propres dense.

**3.6.1.5 Combinaison de ROSENBLUETH TYPE = 'DSC'**

Cette règle (proposée par E. ROSENBLUETH et J. ELORDY [bib2]) introduit une corrélation entre modes, différente de celle de la méthode CQC. Les réponses des oscillateurs sont combinées par double somme (Double Sum Combination) :

$$R_d = \sqrt{\sum_{r_1} \sum_{r_2} \rho_{r_1 r_2} R_{r_1} R_{r_2}}$$

Elle nécessite une donnée supplémentaire, la durée  $s$  de la phase "forte" du séisme définie par l'opérande DUREE.

Le coefficient de corrélation est alors :

$$\rho_{ij} = \left( 1 + \left( \frac{\omega'_i - \omega'_j}{\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j} \right)^2 \right)^{-1}$$

où  $\omega'_i = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}$  et  $\xi_i = \xi + \frac{2}{s \omega_i}$

**3.6.2 Correction statique par pseudo-mode : opérande MODE\_CORR**

La base modale utilisée est en général incomplète. L'évaluation du majorant de la réponse à une excitation sismique nécessite, de ce fait, une correction par un terme représentant la contribution statique des modes propres négligés, dans chaque direction de séisme.

Pour chaque direction du séisme, on réalise cette correction, en ajoutant à la base modale, un pseudo-mode  $\psi$  obtenu à partir d'un mode statique  $\varphi$ , champ de déplacement des nœuds de la structure soumise à une accélération uniforme **dans la direction considérée** défini par :

$$\mathbf{K} \varphi = \mathbf{M} \delta$$

- **K** matrice de rigidité de la structure
- **M** matrice de masse de la structure
- $\delta$  champ unitaire dans la direction du séisme

Le pseudo-mode  $\psi$  est obtenu en soustrayant les contributions statiques des modes pris en compte :

$$\Psi = \varphi - \sum_{r=1}^{nmod} \frac{P_r}{\omega_r^2} \Phi_r \quad \text{avec :}$$

- $\phi_r$  mode propre d'indice  $r$
- $P_r$  facteur de participation dans la direction  $\delta$

Dans cette direction  $\delta$ , pour chaque grandeur, la contribution des modes négligées est donnée par :

$$R_t = R_s - \sum_{r=1}^{nmod} R_r$$

$R_s$  est la grandeur associée au mode statique

◇ `MODE_CORR = acce`

Ce mot clé permet de fournir le(s) champ(s) de déplacement  $\varphi$  des nœuds de la structure soumise à une accélération uniforme dans une (ou plusieurs) direction(s), champ(s) calculé(s) par l'opérateur `MODE_STATIQUE` avec le mot clé `PSEUDO_MODE` [U4.52.14]. Pour toute direction de séisme où la réponse est calculée, on calcule un pseudo-mode si `acce` est fourni.

### 3.6.3 Combinaison suivant les directions : mot clé `COMB_DIRECTION`

◇ `COMB_DIRECTION`

Deux règles de combinaison des réponses directionnelles sont disponibles. Elles sont choisies par l'opérande `TYPE`.

#### 3.6.3.1 Combinaison quadratique : `TYPE = 'QUAD'`

Cette combinaison correspond à l'hypothèse d'indépendance stricte des réponses dans chaque direction :

$$R = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2 + R_Z^2}$$

#### 3.6.3.2 Combinaison de NEWMARK : `TYPE = 'NEWMARK'`

Pour chacune des directions  $i$  ( $X, Y, Z$ ), on calcule les 8 valeurs :

$$R_i = \pm R_X \pm 0,4 R_Y \pm 0,4 R_Z$$

Ce qui conduit, par permutation circulaire, à 24 valeurs et

$$R = \text{Max} (R_i)$$

### 3.7 Cas d'une excitation multi-appuis

Deux traitements sont prévus [bib 3] :

- Calcul de la réponse globale
- Calcul des composantes primaires et secondaires de la réponse

#### 3.7.1 Calcul de la réponse globale

Par rapport au mono-appui, une combinaison supplémentaire est nécessaire. Le schéma de traitement devient :

- Pour chaque appui ou groupe d'appuis indicé par  $i$ , soumis à une excitation différente, on calcule les réponses directionnelles d'appuis  $R_{xi}$  définie par :

$$R_{xi} = \sqrt{R_{di}^2 + R_{ti}^2 + R_{ei}^2}$$

- $R_{di}$  réponse combinée des oscillateurs modaux établie par le mot clé COMB\_MODE [§ 3.6.1]
  - $R_{ti}$  représente la correction des effets statiques des modes négligés. Le terme diffère du cas mono appui. Le calcul est similaire mais fait intervenir le champs de déplacement de la structure soumise à une accélération unitaire de l'appui  $i$  dans la direction X [bib3].
  - $R_{ei}$  contribution du mouvement d'entraînement de l'appui  $i$  ( $R_{ei} \neq 0$  en multi-appui) établie par le mot clé DEPL\_MULT\_APPUI [§ 3.7.4]
- On calcule les réponses directionnelles  $R_x$  par combinaison des réponses directionnelles d'appuis  $R_{xi}$ . La règle de combinaison est définie par le mot clé COMB\_MULT\_APPUI [§ 3.7.3].

La réponse totale  $R$  de la structure est obtenue par combinaison des réponses directionnelles  $R_x$ . La règle de combinaison est définie par le mot clé COMB\_DIRECTION [§ 3.6.3].

### 3.7.2 Partition des composantes primaires et secondaires de la réponse

Pour l'analyse sismique des tuyauteries multi supportées, la partition des composantes inertielles et quasi statiques de la réponse peut s'avérer nécessaire en vue d'un post traitement RCC-M [bib3].

#### 3.7.2.1 Composante primaire inertielle

Il s'agit de la réponse inertielle induite par les accélérations imposées aux ancrages (SRO). On reconduit le traitement adopté pour la réponse globale en supprimant la contribution du mouvement d'entraînement.

- Pour chaque appui ou groupe d'appuis indicé par  $i$ , soumis à une excitation différente, on calcule les réponses directionnelles d'appuis primaire  $R_{IXi}$  définies par :

$$R_{IXi} = \sqrt{R_{di}^2 + R_{ti}^2}$$

- $R_{di}$  réponse combinée des oscillateurs modaux établie par le mot clé *COMB\_MODE* [§ 3.6.1]
- $R_{ti}$  représente la correction des effets statiques des modes négligés. Le terme diffère du cas mono appui. Le calcul est similaire mais fait intervenir le champs de déplacement de la structure soumise à une accélération unitaire de l'appui  $i$  dans la direction X [bib3].
- On calcule les réponses directionnelles  $R_x$  par combinaison des réponses directionnelles d'appuis  $R_{xi}$ . La règle de combinaison est définie par le mot clé *COMB\_MULT\_APPUI* [§ 3.7.3].

La réponse totale  $R$  de la structure est obtenue par combinaison des réponses directionnelles  $R_x$ . La règle de combinaison est définie par le mot clé *COMB\_DIRECTION* [§ 3.6.3].

#### 3.7.2.2 Composante secondaire différentielle

Il s'agit de la réponse statique induite par les déplacements différentiels sismiques des ancrages (mouvement d'entraînement) :

- Calcul de la contribution  $R_{ei}$  du mouvement d'entraînement de l'appui  $i$  établie par le mot clé *DEPL\_MULT\_APPUI* [§ 3.7.4]
- Combinaisons des différentes contributions d'appui  $R_{ei}$  définies par le mot clé *COMB\_DEPL\_APPUI* [§ 3.7.5].

Il est ainsi possible de reconstituer :

- les cas de charge réglementaire correspondant à :
  - un mouvement d'ensemble d'une partie des appuis dans une direction donnée
  - un déplacement mentionné dans un repère local différent du repère global de sollicitation sismique inertielle
- les réponses directionnels en combinant les contributions d'appuis adéquates
- la réponse secondaire totale.

Des exemples sont proposés dans le § 3.7.5.6.

### 3.7.3 Mot clé COMB\_MULT\_APPUI

#### ◇ COMB\_MULT\_APPUI

Les occurrences de ce mot clef permettent de définir les combinaisons directionnelles d'appui pour former la réponse globale de la structure.

Si les occurrences du mot clef COMB\_DEPL\_APPUI sont présentes, c'est la composante primaire de la réponse qui est traitée.

La combinaison des contributions de chaque mouvement d'appui peut être combinée de différentes manières, définies par l'opérande TYPE :

- combinaison quadratique
- combinaison linéaire

L'opérande TYPE est amenée à disparaître dans les versions ultérieures de *Code\_Aster*. Elle sera remplacée par l'opérande TYPE\_COMBI pour plus de lisibilité. En version 6.4, l'utilisateur est libre de choisir l'une des deux syntaxes.

#### 3.7.3.1 Opérandes TOUT / NOEUD / GROUP\_NO

##### ◆ / TOUT = 'OUI'

Permet de choisir que tous les appuis sont combinés avec la règle définie par TYPE

/ NOEUD = lno                           [l\_noeud]  
 / GROUP\_NO = lgrno           [l\_group\_no]

Permet de définir la liste des appuis (ou groupes d'appuis) qui sont combinés avec la règle définie par l'opérande TYPE dans la même occurrence du mot clé COMB\_MULT\_APPUI.

#### 3.7.3.2 Combinaison quadratique TYPE = 'QUAD'

$$R_X = \sqrt{\sum R_{Xj}^2}$$

#### 3.7.3.3 Combinaison linéaire TYPE = 'LINE'

$$R_X = \sum R_{Xk}$$

#### 3.7.3.4 Combinaison linéaire TYPE = 'ABS'

$$R_X = \sum |R_{Xl}|$$

#### 3.7.3.5 Règles de combinaison différentes sur les différents appuis

La règle de combinaison peut être la même pour tous les appuis [§ 3.7.3.1] ou différenciée suivant les appuis ou groupes d'appuis définis par une occurrence du mot clé facteur COMB\_MULT\_APPUI. Dans ce cas la réponse totale - ou la composante primaire de la réponse si COMB\_DEPL\_APPUI est présent - est obtenue par :

$$R_X = \sqrt{\sum R_{Xj}^2 + \left(\sum R_{Xk}\right)^2 + \left(\sum |R_{Xl}|\right)^2}$$

où *j* appuis combinés quadratiquement, *k* appuis combinés linéairement, *l* appuis combinés en valeur absolue.

### 3.7.4 Mot clé **DEPL\_MULT\_APPUI**

◇ **DEPL\_MULT\_APPUI**

Le mouvement d'entraînement de la structure n'étant pas uniforme ce mot clé permet de définir la contribution à la réponse globale d'une liste d'appuis ou de groupes d'appuis. Celle-ci est établie à partir des modes statiques de la structure :

$$R_{ei} = \Phi_{si} \delta_{i\max}$$

avec :

$\Phi_{si}$            mode statique pour l'appui  $i$   
 $\delta_{i\max}$        déplacement relatif maximal de l'appui  $i$  par rapport à un appui de référence  
(pour lequel  $\delta_{i\max} = 0$ )

#### 3.7.4.1 Opérande **NOM\_CAS/NUME\_CAS**

- ◆ **NOM\_CAS** = nomcas  
Chaîne de caractère définissant le nom du cas de charge
- ◆ **NUME\_CAS** = numecas  
Numéro du cas de charge

#### 3.7.4.2 Opérande **MODE\_STAT**

◇ **MODE\_STAT** = stat

Nom des modes statiques  $\phi_{si}$ , concept de type mode\_stat produit par l'opérateur **MODE\_STATIQUE** [U4.52.14]

#### 3.7.4.3 Opérande **NOEUD\_REFE**

◇ **NOEUD\_REFE** = noeu

Nœud de référence par rapport auquel sont définis les déplacements relatifs des appuis.

Si cette opérande est présente, le déplacement relatif maximal appliqué à l'appui  $i$  vaut  $\delta_{i\max} - \Delta$  où  $\Delta$  est le déplacement relatif affecté au nœud de référence noeu dans la direction considérée.

#### 3.7.4.4 Opérandes **NOEUD / GROUP\_NO**

- ◆ / **NOEUD** = lno  
/ **GROUP\_NO** = lgrno  
Liste des noms de nœuds (ou groupes de nœuds) correspondant aux appuis concernés par l'occurrence du mot clé facteur **DEPL\_MULT\_APPUI**.

#### 3.7.4.5 Opérandes **DX / DY / DZ**

- ◆ | **DX** = dx  
| **DY** = dy  
| **DZ** = dz

Valeur de déplacement relatif maximal des appuis concernés, direction par direction.

### 3.7.5 Mot clé COMB\_DEPL\_APPUI

◇ COMB\_DEPL\_APPUI

Les occurrences de ce mot clé définissent les combinaisons des cas de charge réglementaires intervenant dans la composante secondaire de la réponse.

#### 3.7.5.1 Opérandes TOUT / LISTE\_CAS

◆ / TOUT = 'OUI'

Tous les cas de charges définis sous les occurrences de DEPL\_MULT\_APPUI sont combinés avec une règle unique précisée par TYPE

/ LISTE\_CAS = liste

Numéros des cas de charges combinés avec la règle précisée par TYPE

#### 3.7.5.2 Combinaison quadratique TYPE = 'QUAD'

$$R_e = \sqrt{\sum R_{ej}^2}$$

#### 3.7.5.3 Combinaison linéaire TYPE = 'LINE'

$$R_e = \sum R_{ek}$$

#### 3.7.5.4 Combinaison en valeur absolue TYPE = 'ABS'

$$R_e = \sum |R_{el}|$$

#### 3.7.5.5 Règles de combinaison différentes sur les différents cas de charge

La règle de combinaison peut être la même pour tous les cas de déplacement d'ancrage ou différenciée suivant les groupes de cas définis par une occurrence du mot clé facteur COMB\_DEPL\_APPUI. Dans ce cas la réponse totale secondaire est obtenue par :

$$R_{II} = \sqrt{\sum R_{ej}^2 + \left(\sum R_{ek}\right)^2 + \left(\sum |R_{el}|\right)^2}$$

où  $j$  appuis combinés quadratiquement,  $k$  appuis combinés linéairement,  $l$  appuis combinés en valeur absolue.



### 3.7.5.6 Exemples d'application

- Déplacement exprimé dans un repère local  $R_{loc}(x,y,z)$  différent du repère global  $R_{glob}(X,Y,Z)$   
Les axes  $x,y$  et  $z$  de  $R_{loc}$  sont construits par 3 rotations successives d'angle  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  autour des axes  $X,Y$  et  $Z$  de  $R_{glob}$ .  
Pour simplifier l'exemple, on considère que  $R_{loc}$  se déduit de  $R_{glob}$  par une rotation unique autour de l'axe  $X$  et d'angle  $\alpha$  et que le déplacement local  $u_x$  du support  $S$  localisé au noeud  $NS$  est donné suivant l'axe  $x$  de  $R_{loc}$ .  
Ce cas de charge résulte de la combinaison linéaire de 2 modes statiques et se traduit par la sommation algébrique des 2 chargements suivants :
  - déplacement  $DX=u_x \cos \alpha$  suivant l'axe  $X$
  - déplacement  $DY=u_x \sin \alpha$  suivant l'axe  $Y$
Les modes statiques d'appui suivant les directions  $X$  et  $Y$  sont préalablement calculés.  
La prise en compte du cas de charge s'écrit avec la syntaxe suivante :

```
DEPL_MULT_APPUI=(
  _F(
    NOM_CAS='uxcos',
    NUME_CAS=1,
    MODE_STAT=modstat,
    NOEUD='N',
    DX= $u_x \cos \alpha$ ,
  ),
  _F(
    NOM_CAS='uxsin',
    NUME_CAS=2,
    MODE_STAT=modstat,
    NOEUD='N',
    DY= $u_x \sin \alpha$ ,
  ),
)
COMB_DEPL_APPUI=(
  _F(
    LIST_CAS=('1','2'),
    TYPE_COMBI = 'LINE'
  ),
)
```

- Mouvement d'ensemble dans une direction  
Considérons une ligne ancrée sur 3 supports  $S1$ ,  $S2$  et  $S3$ . Un mouvement d'ensemble  $U$  est appliqué aux supports  $S1,S2$  dans la direction  $X$ . Le support  $S3$  lié à la traversée d'un bâtiment est supposée fixe.  
Les modes statiques d'appui dans la direction  $X$  au niveau des supports  $S1$  et  $S2$  sont préalablement calculés.  
La prise en compte du cas de charge s'écrit avec la syntaxe suivante :

```
DEPL_MULT_APPUI=(
  _F(NOM_CAS='depl_S1_X',
    NUME_CAS=1,
    MODE_STAT=modstat,
    NOEUD='NS1',
    DX=U,
  ),
  _F(NOM_CAS='depl_S2_X',
    NUME_CAS=2,
    MODE_STAT=modstat,
    NOEUD='NS2',
    DX=U,
  ),
)
COMB_DEPL_APPUI=(
  _F(
    LIST_CAS=('1','2'),
    TYPE_COMBI = 'LINE'
  ),
)
```

- Réponse par direction et cumul secondaire total

Considérons une ligne ancrée sur 2 supports S1 et S2 et les déplacements différentiels sismiques suivants :

- support S1 : U1, V1 et W1 dans les directions X, Y et Z
  - support S2 : U2, V2 et W2 dans les directions X, Y et Z
- Les 6 modes statiques d'appui sont préalablement calculés.

La saisie des différents cas de charge est réalisée sous les occurrences de DEPL\_MULT\_APPUI :

```
DEPL_MULT_APPUI=(  
    #support S1 au noeud NS1  
    _F(  
        NOM_CAS='depl_S1_X',  
        NUME_CAS=1,  
        MODE_STAT=modstat,  
        NOEUD='NS1',  
        DX=U1,  
    ),  
    _F(  
        NOM_CAS='depl_S1_Y',  
        NUME_CAS=2,  
        MODE_STAT=modstat,  
        NOEUD='NS1',  
        DY=V1,  
    ),  
    _F(  
        NOM_CAS='depl_S1_Z',  
        NUME_CAS=3,  
        MODE_STAT=modstat,  
        NOEUD='NS1',  
        DZ=W1,  
    ),  
    #support S2 au noeud NS2  
    _F(  
        NOM_CAS='depl_S2_X',  
        NUME_CAS=4,  
        MODE_STAT=modstat,  
        NOEUD='NS2',  
        DX=U2,  
    ),  
    _F(  
        NOM_CAS='depl_S2_Y',  
        NUME_CAS=5,  
        MODE_STAT=modstat,  
        NOEUD='NS2',  
        DY=V2,  
    ),  
    _F(  
        NOM_CAS='depl_S2_Z',  
        NUME_CAS=6,  
        MODE_STAT=modstat,  
        NOEUD='NS2',  
        DZ=W2,  
    ),  
),
```

Les réponses directionnelles sont établies sous les occurrences de COMB\_DEPL\_APPUI :

```
COMB_DEPL_APPUI=(  
#cumul suivant X  
  _F(  
    LIST_CAS=('1','4'),  
    TYPE_COMBI = 'QUAD',  
  ),  
#cumul suivant Y  
  _F(  
    LIST_CAS=('2','5'),  
    TYPE_COMBI = 'QUAD',  
  ),  
#cumul suivant Z  
  _F(  
    LIST_CAS=('3','6'),  
    TYPE_COMBI = 'QUAD',  
  ),  
)
```

La réponse totale secondaire est formée par le cumul quadratique des réponses directionnelles. Elle est calculée automatiquement [§ 3.7.3.5].

Si l'impression des réponses directionnelles n'est pas nécessaire, la réponse totale peut se calculer directement sous une seule occurrence de COMB\_DEPL\_APPUI :

```
COMB_DEPL_APPUI=(  
#réponse totale  
  _F(  
    TOUT='OUI',  
    TYPE_COMBI = 'QUAD',  
  ),  
)
```

### 3.8 Option de calcul : opérande OPTION

◆ OPTION

Liste des grandeurs (options de calcul) modales dont on veut déterminer la réponse combinée :

'DEPL'	déplacement relatif
'VITE'	vitesse relative
'ACCE_ABSOLU'	accélération absolue = accélération relative + accélération d'entraînement
'SIGM_ELNO_DEPL'	contraintes par éléments aux nœuds
'SIEF_ELGA_DEPL'	contraintes par éléments aux points d'intégration
'SIPO_ELNO_DEPL'	contraintes dans la section de poutre décomposées en contributions de chaque effort généralisé
'EFGE_ELNO_DEPL'	efforts généralisés par éléments aux nœuds
'EFGE_ELNO_CART'	efforts généralisés par éléments aux nœuds dans le repère cartésien global
'REAC_NODA'	réactions aux appuis
'FORC_NODA'	efforts internes

### 3.9 Opérande TITRE

◇ TITRE = t

Titre attaché au concept produit par cette opérateur [U4.03.01].

### 3.10 Opérande INFO

◇ INFO

/1 : impression sur le fichier " message " des informations suivantes :

- nom de la base modale utilisée,
- nombre de vecteurs propres retenus,
- règle de combinaison modale choisie,
- options de calcul demandées.

/2 : idem 1

### 3.11 Mot clé IMPRESSION

◇ IMPRESSION

Impression sur le fichier " résultat " des informations suivantes :

/ TOUT = 'OUI'  
/ NIVEAU =

'SPEC_OSCI'	Valeurs de l'excitation correspondant aux différents modes
'MASS_EFFE'	grandeurs modales dans la direction de l'excitation et cumul de la masse effective
'MAXI_GENE'	Contributions généralisées maximales

Avec TOUT = 'OUI', on obtient les impressions correspondant à l'ensemble des 3 niveaux définis ci-dessus.

Si le mot clé `COMB_DEPL_APPUI` est présent, les composantes primaires et secondaires de la réponse sont séparées. L'impression sur le fichier "résultat" comporte deux parties distinctes :

- La première spécifique au calcul de la composante primaire avec plusieurs niveaux d'impression :
  - Réponses directionnelles [§3.7.3.5]
  - Combinaison des réponses directionnelles si `COMB_DIRECTION` est présent [§3.6.3]
- La seconde dédiée à la composante secondaire avec plusieurs niveaux d'impression :
  - Champs correspondants aux cas de charge définis sous les occurrences de `DEPL_MULTI_APPUI` [§3.7.4]
  - Champs résultants des combinaisons de cas de charge de déplacement indiquées sous les occurrences de `COMB_DEPL_APPUI` [§3.7.5.2, §3.7.5.3, §3.7.5.4]
  - Cumul quadratique total [§3.7.5.5]

## 4 Bibliographie

- [1] "A response spectrum method for random vibrations" Report UCB/EERC - 80/15 Berkeley (1980)
- [2] "Response of linear systems to certain transient disturbances" Proceedings, Fourth World conference on earthquake engineering - Santiago of Chile (1969)
- [3] Réponse sismique par méthode spectrale [R4.05.03].

Page laissée intentionnellement blanche