

Manuel d'Utilisation
Fascicule U4.5- : Méthodes de résolution
Document U4.53.21

Opérateur DYNA_TRAN_MODAL

1 But

Calculer la réponse dynamique transitoire d'un système amorti ou non en coordonnées généralisées. Le calcul est effectué par superposition modale ou par sous-structuration.

Des conditions initiales non-nulles peuvent être introduites permettant entre autre d'utiliser les résultats d'un calcul antérieur.

Le chargement est donné sous la forme d'une combinaison linéaire de vecteurs généralisés et de fonctions du temps décrivant l'évolution temporelle de ces vecteurs.

Trois méthodes d'intégration explicites : 'EULER', 'DEVOGE', 'ADAPT' (méthode d'intégration à pas de temps adaptatif), une méthode intégrale 'ITMI' et une méthode d'intégration implicite : 'NEWMARK' sont disponibles. Les algorithmes explicites et 'ITMI' supportent le calcul avec prise en compte de non-linéarités localisées aux nœuds de type chocs et frottement. Les méthodes 'EULER' et 'ADAPT' supportent la prise en compte de non-linéarités de type lame fluide et de type dispositif anti-sismique.

La structure de données `resultat` contient pour différents instants de calcul, les résultats généralisés et les forces de choc calculées.

La conversion des résultats généralisés dans l'espace physique est possible par les opérateurs `REST_BASE_PHYS` [U4.63.21] ou pour une composante par `RECU_FONCTION` [U4.32.03].

Produit un concept de type `tran_gene`.

Table des matières

1 But 1	
2 Syntaxe	4
3 Opérandes	8
3.1 Matrices généralisées.....	8
3.2 Algorithmes d'intégration	8
3.2.1 Opérande METHODE	8
3.2.2 Mot clé INCREMENT.....	11
3.3 Mot clé ETAT_INIT.....	12
3.3.1 Opérandes RESU_GENE / DEPL_INIT_GENE / VITE_INIT_GENE	12
3.3.2 Opérande INST_INIT.....	12
3.3.3 Opérande CRITERE	12
3.3.4 Opérande PRECISION.....	12
3.4 Description du chargement : mot clé EXCIT.....	13
3.4.1 Opérandes VECT_GENE / NUME_ORDRE	13
3.4.2 Opérande FONC_MULT / COEF_MULT.....	13
3.5 Cas particulier de l'analyse sismique	13
3.5.1 Prise en compte des modes négligés par correction statique : mots clés MODE_CORR, CORR_STAT et D_FONC_*	13
3.5.2 Prise en compte du multi-appuis : mots clés MODE_STAT, MULTI_APPUI et ACCE, VITE, DEPL 14	
3.6 Prise en compte de non linéarités localisées de type choc, frottement et lame fluide.....	15
3.6.1 Non linéarités localisées de type choc et frottement : mot clé CHOC	15
3.6.2 Non linéarités localisées de type lame fluide	19
3.7 Mot clé VERI_CHOC.....	20
3.8 Mot clé ANTI_SISM.....	20
3.9 Mot clé FLAMBAGE	21
3.10 Mot clé RELA_EFFO_DEPL.....	21
3.10.1 Opérande NOEUD	22
3.10.2 Opérande SOUS_STRUC.....	22
3.10.3 Opérande NOM_CMP	22
3.10.4 Opérande RELATION.....	22
3.11 Mot clé RELA_TRANSIS	22
3.12 Mot clé RELA_EFFO_VITE.....	23
3.13 Réponse de systèmes mécaniques très faiblement amortis avec couplages fluidélastiques	23
3.14 Mot clé ARCHIVAGE.....	25
3.14.1 Opérande LIST_ARCH.....	25
3.14.2 Opérande PAS_ARCH.....	25
3.15 Opérande INFO	25

3.16	Opérande IMPRESSION.....	26
3.16.1	Opérandes TOUT / NIVEAU.....	26
3.16.2	Opérandes INST_INIT / INST_FIN.....	26
3.17	Opérande TITRE	27
4	Phase d'exécution	27
4.1	Vérification sur les matrices	27
4.2	Vérification et conseil sur le choix du pas de temps pour les schémas EULER, DEVOGE et NEWMARK :.....	27
4.3	Phase d'exécution pour la méthode 'ADAPT' :.....	27
4.4	Phase d'exécution pour la méthode 'ITMI'	28

2 Syntaxe

```
tranmo [tran_gene] = DYNA_TRAN_MODAL    (

    ◇ reuse =      tranmo,

    ◆ MASS_GENE =      ma ,                [matr_asse_gene_R]
    ◆ RIGI_GENE =      ri ,                [matr_asse_gene_R]
    ◇ / AMOR_GENE =      am ,                [matr_asse_gene_R]
      / AMOR_REDUIT =      la ,                [l_R]
      / LIST_AMOR =      l_amor ,            [listr8]

    ◇ METHODE =      / 'EULER',            [DEFAULT]
                      / 'DEVOGE',
                      / 'NEWMARK',
                      / 'ADAPT',
                      / 'ITMI',

    ◆ INCREMENT = _F( ◇ INST_INIT =      to,            [R]
                      ◆ INST_FIN =      tf,            [R]
                      ◇ PAS =      dt,            [R]
                      ◇ VERI_PAS =      / 'OUI',        [DEFAULT]
                      / 'NON',

    # Opérandes spécifiques à une intégration par pas de temps adaptatifs
      ◇ VITE_MIN =      / 'NORM',            [DEFAULT]
                      / 'MAXI',
      ◇ COEF_MULT_PAS = / 1.1 ,                [DEFAULT]
                      / cmp ,                [R]
      ◇ COEF_DIVI_PAS = / 1.33333334, [DEFAULT]
                      / cdp ,                [R]
      ◇ PAS_LIMI_RELA = / 1.E-6,            [DEFAULT]
                      / per ,                [R]
      ◇ NB_POIN_PERIODE = / 50,            [DEFAULT]
                      / N,                    [I]
      ◇ NMAX_ITER_PAS = / 16,                [DEFAULT]
                      / N,                    [I]

    # Fin des opérandes spécifiques à une intégration par pas de temps adaptatifs
    ),

    ◇ ETAT_INIT = _F( ◆ / RESU_GENE =      res,        [tran_gene]
                      # Si RESU_GENE
                        ◇ INST_INIT =      to,            [R]
                        ◇ CRITERE =
                          / 'RELATIF', [DEFAULT]
                          / 'ABSOLU',
                        ◇ PRECISION =
                          / 1.E-3,        [DEFAULT]
                          / prec,        [R]
                      / | DEPL_INIT_GENE = do, [vect_asse_gene]
                      | VITE_INIT_GENE = vo, [vect_asse_gene]
                      ),

    ◇ EXCIT = _F( ◇ VECT_GENE = v,                [vect_asse_gene]
                  ◇ NUME_ORDRE = nmordr,          [I]
                  ◆ / FONC_MULT = f,              [fonction]
                    / COEF_MULT = a,              [R]
                    / ◆ ACCE = ac,                [fonction]
                      ◆ VITE = vi,                [fonction]
                      ◆ DEPL = dp,                [fonction]

    # Opérandes et mots clés spécifiques à l'analyse sismique [§3.5]
      ◇ MULT_APPUI = / 'NON',                    [DEFAULT]
                    / 'OUI',
```

```

        ◇ DIRECTION = (dx,dy,dz,drx,dry,drz), [l_R]
        ◇ / NOEUD = lno, [l_noeud]
        / GROUP_NO = lgrno, [l_groupe_no]

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

        ◇ D_FONC_DT = dfdt, [fonction]
        D_FONC_DT2 = dfdt2, [fonction]
    )

    ◇ / MODE_STAT = psi, [mode_stat]
    / MODE_CORR = modcor, [mult_elas]
),
# Fin des opérandes et mots clés spécifiques à l'analyse sismique

◇ CHOC = _F( [§3.6.1]
    ◇ INTITULE = int, [l_Kn]

    / ◆ / NOEUD_1 = no1, [noeud]
    / / GROUP_NO_1 = grno1, [group_no]
    ◇ / NOEUD_2 = no2, [noeud]
    / / GROUP_NO_2 = grno2, [group_no]
    / ◆ / MAILLE = ma, [maille]
    / / GROUP_MA = grma, [group_ma]

    ◆ OBSTACLE = obs, [obstacle]
    ◆ NORM_OBST = nor, [listr8]
    ◇ ORIG_OBST = ori, [listr8]
    ◇ JEU = / 1., [DEFAULT]
    / jeu, [R]

    ◇ ANGL_VRIL = gamma, [R]

    ◇ DIST_1 = dist1, [R]
    ◇ DIST_2 = dist2, [R]

    ◇ SOUS_STRUC_1 = ss1, [K8]
    ◇ SOUS_STRUC_2 = ss2, [K8]
    ◇ REPERE = / 'GLOBAL', [DEFAULT]
    / nom_sst, [K8]

    ◇ RIGI_NOR = kn, [R]
    ◇ AMOR_NOR = / 0., [DEFAULT]
    / cn, [R]
    ◇ RIGI_TAN = / 0., [DEFAULT]
    / kt, [R]
    ◇ AMOR_TAN = / 0., [DEFAULT]
    / ct, [R]
    ◇ COULOMB = / 0., [DEFAULT]
    / mu, [R]

```

Opérandes et mots clés spécifiques à la prise en compte d'une lame fluide

[§3.6.2]

```

◇ LAME_FLUIDE = / 'NON',
                  / 'OUI',
# si LAME_FLUIDE='OUI' :
◇ ALPHA = / 0.,
            / alpha,
◇ BETA = / 0.,
          / beta,
◇ CHI = / 0.,
         / chi,
◇ DELTA = / 0.,
           / delta,
◇ NMAX_ITER = / 20,
               / niter,
◇ RESI_RELA = / 1.E-3,
               / residu,
◇ LAMBDA = / 10.,
            / lambda,

```

[DEFAULT]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[I]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]),

Fin des opérandes et mots clés spécifiques à la prise en compte d'une lame fluide

```

◇ VERI_CHOC = _F(
◇ STOP_CRITERE = / 'OUI',
                  / 'NON',
◇ SEUIL = / 0.5,
           / s,
),

```

[§3.7]

[DEFAULT]

[DEFAULT]

[R]

```

◇ ANTI_SISM = _F(
◇ / NOEUD_1 = no1,
  / GROUP_NO_1 = grno1,
◇ / NOEUD_2 = no2,
  / GROUP_NO_2 = grno2,
◇ RIGI_K1 = / 0.,
            / kn,
◇ RIGI_K2 = / 0.,
            / kn,
◇ SEUIL_FX = / 0.,
              / Py,
◇ C = / 0.,
       / C,
◇ PUIS_ALPHA = / 0.,
                / alpha,
◇ DX_MAX = / 1.,
            / dx,
),

```

[§3.8]

[noeud]

[group_no]

[noeud]

[group_no]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

```

◇ FLAMBAGE = _F(
◇ / NOEUD_1 = no1,
  / GROUP_NO_1 = grno1,
◇ / NOEUD_2 = no2,
  / GROUP_NO_2 = grno2,
◇ OBSTACLE = obs,
◇ ORIG_OBST = ori,
◇ NORM_OBST = nor,
◇ ANGL_VRIL = / 0,
               / gamma,
◇ JEU = / 1.,
        / jeu,
◇ DIST_1 = dist1,
◇ DIST_2 = dist2,
◇ REPERE = / 'GLOBAL',
            / nom_sst,
◇ RIGI_NOR = kn,
◇ FNOR_CRIT = flim,
◇ FNOR_POST_FL = fseuil,
◇ RIGI_NOR_POST_FL = k2,
),

```

[§3.9]

[noeud]

[group_no]

[noeud]

[group_no]

[obstacle]

[listr8]

[listr8]

[DEFAULT]

[R]

[DEFAULT]

[R]

[R]

[R]

[DEFAULT]

[K8]

[R]

[R]

[R]

[R]

Titre : Opérateur DYNA_TRAN_MODAL
Auteur(s) : **E. BOYERE**

Date : 12/06/07
Clé : U4.53.21-H Page : 7/28

```

◇  RELA_EFFO_DEPL = _F(                                     [$3.10]
    ◆  NOEUD =      noe,                                     [noeud]
    ◇  SOUS_STRUC =  ss,                                     [K8]
    ◇  NOM_CMP =    nomcmp,                                 [K8]
    ◆  RELATION =   f,                                     [fonction]
    ),

◇  RELA_TRANSIS = _F(                                     [$3.11]
    ◆  NOEUD =      noe,                                     [noeud]
    ◇  SOUS_STRUC =  ss,                                     [K8]
    ◇  NOM_CMP =    nomcmp,                                 [K8]
    ◆  RELATION =   f,                                     [fonction]
    ),

◇  RELA_EFFO_VITE = _F(                                     [$3.12]
    ◆  NOEUD =      noe,                                     [noeud]
    ◇  SOUS_STRUC =  ss,                                     [K8]
    ◇  NOM_CMP =    nomcmp,                                 [K8]
    ◆  RELATION =   f,                                     [fonction]
    ),

# Mots clés associés uniquement à la méthode 'ITMI'          [$3.13]
◇  BASE_ELAS_FLUI =   meles,                                [melasflu]
◇  NUME_VITE_FLUI  =   Nvitf,                                [I]
◇  ETAT_STAT       =   /  'NON',                             [DEFAULT]
                        /  'OUI',
◇  PREC_DUREE      =   /  1.E-2,                             [DEFAULT]
                        /  prec,                               [R]
◇  CHOC_FLUI       =   /  'NON',                             [DEFAULT]
                        /  'OUI',
◇  NB_MODE         =   Nmode,                                [I]
◇  NB_MODE_FLUI    =   Nmodef,                               [I]
◇  TS_REG_ETAB     =   tsimu,                                 [R]
# Fin des mots clés associés uniquement à la méthode 'ITMI'

◇  ARCHIVAGE = _F(◆ /  LIST_ARCH =  l_arch,                 [l_I] [$3.14]
                  /  PAS_ARCH  =  ipa,                       [I]
                  ),

◇  INFO       =   /  1,                                     [DEFAULT]
                  /  2,

◇  IMPRESSION = _F(
    ◇  /  TOUT = 'OUI',                                     [DEFAULT]
    ◇  /  NIVEAU = | 'DEPL_LOC',
                  | 'VITE_LOC',
                  | 'FORC_LOC',
                  | 'TAUX_CHOC',
    ◇  INST_INIT = ti,                                     [R]
    ◇  INST_FIN  = tf,                                     [R]
    ),

◇  TITRE      =  titre,                                     [l_Kn]
)

```

3 Opérandes

3.1 Matrices généralisées

Dans le cas d'un calcul par recombinaison modale, les matrices généralisées doivent être établies par l'opérateur PROJ_MATR_BASE [U4.63.12] ou par la macro-commande MACRO_PROJ_BASE [U4.63.11], à partir de la même base modale.

Dans le cas d'un calcul par sous-structuration dynamique, les matrices généralisées doivent être établies par l'opérateur ASSE_MATR_GENE [U4.65.04], à partir de la même numérotation généralisée.

◆ MASS_GENE = ma

Matrice de masse du système généralisé.
Concept de type matr_asse_gene_R.

◆ RIGI_GENE = ri

Matrice de rigidité du système généralisé.
Concept de type matr_asse_gene_R.

◇ / AMOR_GENE = am

Matrice d'amortissement du système généralisé.
Concept de type matr_asse_gene_R.
Cette option n'est pas disponible avec la méthode 'DEVOGE'.

/ AMOR_REDUIT = lam

Liste des amortissements réduits (pourcentage de l'amortissement critique) correspondants à chaque mode du système sous forme de liste de réels.

Cette option n'est pas disponible en sous-structuration dynamique car les amortissements réduits doivent être définis pour chaque sous-structure séparément (opérateur MACR_ELEM_DYNA [U4.65.01]).

Remarque :

Si le nombre d'amortissements réduits donnés est inférieur au nombre de vecteurs de base utilisés dans la base modale, les amortissements des vecteurs supplémentaires sont pris égaux au dernier amortissement de la liste.

/ LIST_AMOR = l_amor

Liste des amortissements réduits sous forme de concept listr8.

3.2 Algorithmes d'intégration

3.2.1 Opérande METHODE

◇ METHODE =

Choix de la méthode numérique de résolution.

Dans le cas d'un calcul classique par recombinaison modale, l'utilisateur dispose de trois méthodes de type explicite, d'une méthode intégrale et d'une méthode de type implicite.

Dans le cas d'un calcul par sous-structuration dynamique [R4.06.04], la méthode de calcul transitoire sur base modale calculée par sous-structuration supporte tous les schémas d'intégration évoqués sauf la méthode intégrale. En revanche, la méthode de calcul transitoire sur les "bases" des sous-structures ne supporte que le schéma d'Euler et le schéma à pas de temps adaptatif.

3.2.1.1 METHODE = 'EULER' : schéma explicite d'ordre 1

Ce schéma supporte le calcul avec prise en compte de l'ensemble des non-linéarités localisées disponibles.

3.2.1.2 METHODE = 'DEVOGE' : schéma explicite d'ordre 4

Le schéma de DEVOGELAERE supporte le calcul avec prise en compte de l'ensemble des non-linéarités localisées disponibles.

3.2.1.3 METHODE = 'NEWMARK' : schéma implicite

Ce schéma ne permet que l'intégration de problèmes linéaires.

3.2.1.4 METHODE = 'ADAPT' : schéma explicite d'ordre 2

Ce schéma supporte le calcul avec prise en compte de l'ensemble des non-linéarités localisées disponibles. Cette méthode utilise le schéma des différences centrées, l'algorithme d'adaptation du pas de temps s'appuie sur le calcul d'une "fréquence apparente" :

$$f_{APt} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\ddot{x}_t - \ddot{x}_{t-1}}{x_t - x_{t-1}}}$$

On précise ci après les opérandes spécifiques à la méthode d'intégration par pas de temps adaptatifs. Ce sont les opérandes suivants du mot clé facteur INCREMENT :

◇ NB_POIN_PERIODE = N

Nombre de points par période apparente. C'est ce paramètre qui fixe la précision du calcul. Il doit être au moins égal à 20 ; sa valeur par défaut (50) garantit une précision satisfaisante (de l'ordre de 1%) dans la plupart des cas.

◇ VITE_MIN =

Méthode de calcul de la vitesse de référence utilisée pour évaluer la fréquence apparente.

Quand le dénominateur de la fréquence apparente ($x_n - x_{n-1}$) devient faible, celle-ci peut devenir très élevée, ce qui conduit à un raffinement injustifié du pas de temps. Pour y remédier, l'algorithme utilise le critère suivant :

$$\frac{|x_n - x_{n-1}|}{\Delta t} \leq V_{\min} \Rightarrow f_{APn} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(\ddot{x}_n - \ddot{x}_{n-1})}{V_{\min} \Delta t}}$$

V_{\min} peut être calculé de deux façons différentes selon la valeur de VITE_MIN :

$$'NORM' = V_{\min}(t_n) = \frac{\|V(t_n)\|}{100} \text{ pour tous les degrés de liberté.}$$

Peut être utilisé :

- si le système possède plusieurs degrés de liberté,
- si l'ordre de grandeur du déplacement n'est pas trop différent selon les degrés de liberté.

$$'MAXI' = V_{\min}^i(t_n) = \frac{\max_{0 < t_p < t_n} (|V^i(t_p)|)}{100} \text{ pour le degré de liberté } i.$$

Peut être utilisé :

- si le système possède un petit nombre de degrés de liberté (de 1 à 3),
- pour un système à plusieurs degrés de liberté, dans le cas où l'ordre de grandeur du déplacement est très différent selon les degrés de liberté (par exemple en présence de ddl de Lagrange en sous-structuration),
- si l'ordre de grandeur de la vitesse ne varie pas trop au cours du temps.

◇ NMAX_ITER_PAS = N

Nombre maximal de réductions du pas de temps par pas de calcul. Il est par défaut égal à 16, ce qui limite le coefficient de réduction du pas à $0.75^{16} = 10^{-2}$ par itération (lorsque le pas de temps est trop élevé, on reprend le calcul avec un pas plus faible : $\Delta t'_n = 0.75 \Delta t_n$).

NMAX_ITER_PAS peut être :

- augmenté pour permettre au pas de temps de chuter de façon plus brutale,
- diminué si le pas de temps semble excessivement raffiné, par exemple en présence de discontinuités (frottement sec, excitation discontinue, ...).

◇ COEF_MULT_PAS = cmp

Coefficient d'augmentation du pas lorsque l'erreur est suffisamment faible :

$$\Delta t_n < \frac{0.75}{Nf_{APn}} \Rightarrow \Delta t_{n+1} = \text{cmp} \Delta t_n.$$

Sa valeur par défaut (cmp = 1.1) garantit stabilité et précision, mais il peut en général être augmenté (au plus jusqu'à 1.3) pour accélérer l'intégration.

◇ COEF_DIVI_PAS = cdp

Coefficient de raffinement du pas de temps (>1) lorsque l'erreur est supérieure à 1, que le nombre d'itérations maximales (N_MAX_ITER_PAS) n'est pas atteint et que le pas de temps minimal n'est pas atteint :

$$\Delta t_n < \frac{1}{Nf_{APn}}, N_{\text{iter}} < N_{\text{iter_max}} \text{ et } \Delta t_n > \text{plr} \cdot \Delta t_{\text{initial}} \\ \Rightarrow \Delta t_n = \frac{\Delta t_n}{\text{cdp}}$$

La valeur par défaut est de 1.33333334, soit une réduction d'un facteur 0.75.

◇ PAS_LIMI_RELA = plr

Coefficient appliqué au pas de temps initial pour définir la limite de raffinement et donc le pas de temps minimal :

La valeur par défaut est de 1.33333334, soit une réduction d'un facteur 0.75.

$$\Delta t_{\min} = \text{plr} \cdot \Delta t_{\text{initial}}$$

3.2.2 Mot clé INCREMENT

3.2.2.1 Opérandes INST_INIT / INST_FIN

◆ INST_INIT = to

- Méthodes 'EULER', 'DEVOGE', 'NEWMARK', 'ADAPT' :

Instant de début du calcul transitoire. En cas de reprise, on utilise le mot clé ETAT_INIT cf. [§3.3] : sous ce mot clé, l'instant initial est récupéré avec l'opérande INST_INIT ou pris égal au dernier instant de calcul précédent archivé. L'opérande INST_INIT doit donc être utilisé uniquement s'il n'y a pas de reprise d'un calcul précédent.

- Méthode 'ITMI' :

Désigne l'instant de début de simulation. Lorsque le calcul en un pas de temps de la phase transitoire est demandé, la simulation débute à INST_INIT + « temps de calcul du transitoire »

◆ INST_FIN = tf

Instant de simulation.

3.2.2.2 Opérandes PAS / VERI_PAS

◇ PAS = dt

- Méthodes 'EULER', 'DEVOGE', 'NEWMARK' :
Pas de temps du calcul transitoire.

- Méthode 'ADAPT' :

Désigne à la fois le pas de temps initial et le pas de temps maximal utilisés par l'algorithme. Ce paramètre doit être suffisamment faible :

- pour permettre le calcul des phases statiques (qui utilise toujours le pas de temps maximal),
- pour démarrer correctement l'algorithme.

Il doit cependant être suffisamment élevé pour ne pas pénaliser l'ensemble du calcul.

- Méthode 'ITMI' :

Désigne le pas de temps retenu pour le premier pas de calcul (après passage éventuel du transitoire). Par la suite, l'algorithme gère automatiquement le pas de calcul en fonction de la rigidité de la structure et des zones de transition vol/choc.

◇ VERI_PAS = rep

Vérification du pas de temps de calcul relativement au pas de temps limite déterminé en fonction de la fréquence la plus élevée des modes de la base modale considérée ou des bases des sous-structures (cf [§4.2]).

3.3 Mot clé **ETAT_INIT**

Mot clé facteur qui permet une poursuite d'un calcul transitoire, en prenant comme état initial :

- soit un résultat issu d'un calcul par synthèse modale précédent `EXCIT(RESU_GENE)` ;
- soit des déplacements et vitesses exprimés sous forme de vecteurs assemblés généralisés `EXCIT(DEPL_INIT_GENE et VITE_INIT_GENE)`

Remarques :

- *Cette fonctionnalité n'est pas disponible pour un calcul par sous-structuration transitoire sans double projection ni pour la méthode ITMI.*
- *Lors d'une poursuite, l'état d'adhérence ou de choc n'est pas sauvegardé.*
- *Les déplacements et vitesses généralisés doivent être établis par l'opérateur `PROJ_VECT_BASE` [U4.63.13] à partir de la base modale utilisée pour les matrices de rigidité généralisées ou par l'opérateur `RECU_GENE` [U4.71.03] appliqué à un calcul précédent.*

3.3.1 Opérands **RESU_GENE** / **DEPL_INIT_GENE** / **VITE_INIT_GENE**

◆ / `RESU_GENE` = tran

Concept de type `tran_gene` issu d'un calcul précédent avec `DYNA_TRAN_MODAL`.

/ | `DEPL_INIT_GENE` = do

Concept de type `vect_asse_gene`, déplacements généralisés initiaux.

| `VITE_INIT_GENE` = vo

Concept de type `vect_asse_gene`, vitesses généralisées initiales.

3.3.2 Opérande **INST_INIT**

◇ `INST_INIT` = to

Instant du calcul précédent à extraire et à prendre comme état initial dans le cas d'une reprise. En l'absence de cet opérande, l'instant de reprise est pris égal au dernier instant de calcul précédent archivé.

3.3.3 Opérande **CRITERE**

◇ `CRITERE`

Indique avec quelle précision la recherche de l'instant doit se faire :

'RELATIF' : intervalle de recherche [(1-prec).instant, (1+prec).instant]

'ABSOLU' : intervalle de recherche [instant-prec, instant+prec]

Le critère est 'RELATIF' par défaut.

3.3.4 Opérande **PRECISION**

◇ `PRECISION` = / 1.E-03 [DEFAULT]
 / prec [R8]

Indique avec quelle précision la recherche de l'instant doit se faire.

3.4 Description du chargement : mot clé EXCIT

◇ EXCIT

Mot clé définissant le chargement. Ce mot clé doit être répété autant de fois qu'il y a de vecteurs chargement généralisé \mathbf{f}_i . Le chargement total est la somme de ces vecteurs chargement.

3.4.1 Opérandes VECT_GENE / NUME_ORDRE

Le chargement est pris en compte sous forme de vecteur projeté sur la base modale $\text{EXCIT} = _F(\text{VECT_GENE})$ ou sous forme de composante modale $\text{EXCIT} = _F(\text{NUME_MODE})$ ou les deux à la fois.

/ VECT_GENE = v

Vecteur généralisé permettant de décrire la répartition spatiale du chargement.
Concept de type `vect_asse_gene`.

Les vecteurs généralisés doivent être établis par l'opérateur `PROJ_VECT_BASE` [U4.63.13] à partir de la base modale utilisée pour les matrices généralisées. Dans le cas d'un calcul par sous-structuration dynamique, les vecteurs généralisés doivent être établis par l'opérateur `ASSE_VECT_GENE` [U4.65.05] à partir de la numérotation généralisée utilisée pour les matrices généralisées.

/ NUME_ORDRE = nmordre

Numéro d'ordre du mode d'excitation de la structure (Attention ! Il ne faut pas confondre le numéro d'ordre du mode – donné par le calcul modal dans l'ordre où ils ont été calculés – et le numéro du mode, intitulé dans *Code_Aster* `NUME_MODE`).

3.4.2 Opérande FONC_MULT / COEF_MULT

◆ / FONC_MULT = f

Fonction du temps (*fonction*) permettant de décrire l'évolution temporelle du vecteur chargement.

/ COEF_MULT = a

Coefficient multiplicateur du vecteur généralisé (valeur réelle constante par rapport au temps).

3.5 Cas particulier de l'analyse sismique

3.5.1 Prise en compte des modes négligés par correction statique : mots clés MODE_CORR, CORR_STAT et D_FONC_*

Lors de l'analyse sismique d'une structure mono excitée, il est possible de prendre en compte, a posteriori, l'effet statique des modes négligés. Dans ce cas, lors du retour sur la base physique, les déplacements relatifs calculés (respectivement les vitesses et accélérations relatives) sont corrigés par un pseudo-mode.

On trouvera les détails de ce type de correction dans [R4.05.01].

Les mots clés `MODE_CORR` et `EXCIT` (`CORR_STAT`, `D_FONC_DT` et `D_FONC_DT2`) spécifiques à la correction statique a posteriori doivent être simultanément présents.

◇ `MODE_CORR = modcor`

Concept de type `mult_elas` produit par la macro-commande `MACRO_ELAS_MULT` [U4.51.02] qui correspond à la réponse statique linéaire de la structure à un chargement unitaire de type force imposée (accélération uniforme) dans la direction du séisme considérée.

On note qu'il y a autant de cas de charge que de direction de séisme.

◇ EXCIT = _F(CORR_STAT)

Si MODE_CORR est présent, CORR_STAT = 'OUI' permet de prendre en compte la contribution de la correction modale a posteriori pour chaque occurrence du mot clé EXCIT.

◇ EXCIT = _F(D_FONC_DT et D_FONC_DT2)

D_FONC_DT et D_FONC_DT2 sont respectivement les dérivées premières et dérivées secondes du temps de l'accélérogramme défini, dans chaque direction sismique considérée, par l'opérande FONC_MULT. Elles pondèrent la contribution de la correction modale a posteriori pour chaque occurrence du mot clé EXCIT afin d'obtenir respectivement les corrections de vitesse et d'accélération sur la base physique.

Remarques :

- La prise en compte de la correction statique exclue celle du multi-appuis.
- Le concept mult_elas doit s'appuyer sur une numérotation des équations cohérente (même profil et même option de renumérotation) avec celle du système résolu dans l'opérateur DYNAL_TRAN_MODAL.
- A la ième occurrence du mot clé EXCIT correspond la ième solution élastique de MODCOR.

3.5.2 Prise en compte du multi-appuis : mots clés MODE_STAT, MULTI_APPUI et ACCE, VITE, DEPL

Dans le cas d'une structure multi-supportée, afin de restituer les grandeurs calculées dans le repère absolu ou prendre en compte des non linéarités localisées, il faut calculer la réponse généralisée en prenant en compte la composante d'entraînement.

Pour plus de détails, on se reportera à la référence [R4.05.01].

Les mots clés MODE_STAT et EXCIT (MULT_APPUI ; ACCE, VITE, et DEPL ; DIRECTION et NOEUD ou GROUP_NO) spécifiques à la prise en compte du caractère multi-supporté doivent être simultanément présents.

◇ MODE_STAT = psi

Concept de type mode_stat produit par la commande MODE_STATIQUE [U4.52.14] qui correspond aux (3 ou 6).nb_supports modes statiques (où nb_supports est le nombre de supports qui subissent une accélération différente).

◇ EXCIT = _F(MULT_APPUI)

Si on calcule la réponse sismique d'une structure multi-supportée, MULT_APPUI = 'OUI', on compare à chaque instant, le vecteur des déplacements absolus de chacun des points de choc considérés, afin de déterminer si il y a choc et de calculer les forces de choc correspondantes. Sinon, MULT_APPUI = 'NON', on compare à chaque instant, le vecteur des déplacements relatifs de chacun des nœuds susceptibles de choquer.

◇ / ◆ ACCE = ac,
 ◆ VITE = vi,
 ◆ DEPL = dp

Noms des fonctions accélération (ACCE), vitesse (VITE) et déplacement (DEPL) imposées lors du calcul de la réponse sismique de structures multi-supportées.

Remarque :

| Si la structure est mono-excitée, l'accélérogramme est défini par le mot clé FONC_MULT.

◇ DIRECTION =(dx, dy, dz, drx, dry, drz)

Composantes du vecteur donnant la direction du séisme dans le repère global.

◇ / NOEUD = lno
/ GROUP_NO = lgrno

Liste des noms de nœuds (ou de groupe de nœuds) correspondants aux appuis concernés où le séisme est imposé.

3.6 Prise en compte de non linéarités localisées de type choc, frottement et lame fluide

3.6.1 Non linéarités localisées de type choc et frottement : mot clé CHOC

◇ CHOC

Ce mot clé facteur est utilisé pour l'étude de la réponse de structures (généralement élançées) dont les déplacements sont limités en un (ou plusieurs) point(s) -précisés a priori par l'utilisateur- par la présence d'un obstacle (les différents types d'obstacles disponibles sont décrits dans la documentation [U4.44.21] de l'opérateur DEFI_OBSTACLE), d'une autre structure antagoniste ou d'un effet de lame fluide.

3.6.1.1 Opérande INTITULE

◇ INTITULE = int

Intitulé (huit caractères au maximum) permettant de nommer la non-linéarité. Si rien n'est précisé par l'utilisateur, l'intitulé est le nom du NOEUD_1.

3.6.1.2 Opérands NOEUD_1 / NOEUD_2 / GROUP_NO_1 / GROUP_NO_2 . / GROUP_MA

/ ♦ NOEUD_1 ou GROUP_NO_1

Nœud ou nom du groupe de nœud de la structure sur lequel porte la condition de non-linéarité. Dans le cas d'un calcul non-linéaire par sous-structuration dynamique, on indique sous ce mot clé le nœud de choc appartenant à la première sous-structure (les différentes sous-structures n'appartiennent pas au même maillage).

◇ NOEUD_2 ou GROUP_NO_2

Nœud ou nom du groupe de nœud de la seconde structure sur lequel porte la condition de non-linéarité. Cette opérande est spécifique à la définition d'un contact entre deux structures mobiles.

Dans le cas d'un calcul non-linéaire par sous-structuration dynamique, on précise le nœud de choc coïncidant avec le nœud indiqué dans NOEUD_1 (ou GROUP_NO_1), mais appartenant à la deuxième sous-structure.

Remarque :

| On vérifie que les groupes de nœuds contiennent bien un et un seul nœud.

/ ♦ GROUP_MA ou MAILLE

On peut aussi entrer les nœuds de chocs en vis à vis sous la forme de mailles SEG2 dessinées dans le maillage. Ainsi on conserve une même façon de décrire les chocs que DYNA_NON_LINE ou DYNA_TRAN_EXPLI avec les éléments discrets de choc (DIS_CHOC). On peut entrer une liste de MAILLE ou de GROUP_MA.

3.6.1.3 Opérande OBSTACLE

♦ OBSTACLE = obs

Nom du concept de type `obstacle` définissant la géométrie d'un obstacle indéformable ou la forme enveloppe du jeu entre deux structures antagonistes. Il est produit par l'opérateur `DEFI_OBSTACLE` [U4.44.21].

3.6.1.4 Opérande NORM_OBST

♦ NORM_OBST = nor

Liste de 3 réels définissant la normale au plan de coupe de l'obstacle, c'est-à-dire le vecteur \mathbf{x}_{loc} . On conseille que \mathbf{x}_{loc} soit la direction de la fibre neutre ou d'une génératrice de la structure étudiée.

3.6.1.5 Opérande ORIG_OBST

♦ ORIG_OBST = ori

Liste de 3 réels définissant la position de l'origine de l'obstacle dans le repère global (mot clé obligatoire dans le cas de chocs entre une structure mobile et une paroi fixe). Dans le cas de chocs entre deux structures mobiles, le code considère par défaut que l'origine est située au milieu des deux nœuds de choc `NOEUD_1` (ou nœud du `GROUP_NO_1`) et `NOEUD_2` (ou nœud du `GROUP_NO_2`).

3.6.1.6 Opérande JEU

♦ JEU = jeu

Dans le cas d'un choc entre une structure mobile et un obstacle indéformable, l'opérande `JEU` représente :

- la demi-distance inter-plans pour des obstacles de type `PLAN_Y` et `PLAN_Z`
- le rayon de l'obstacle circulaire pour un obstacle de type `CERCLE`

Ce mot clé est inutilisé dans le cas d'obstacles discrétisés par segments de type `DISCRET`.

Remarque :

L'obstacle de type `PLAN_Y` ou `PLAN_Z` comporte en fait deux obstacles plans. Ainsi dans le cas où l'utilisateur souhaite modéliser le choc sur un plan unique, pour ne pas être gêné par le rebond de la structure étudiée sur le plan symétrique, on conseille à l'utilisateur de le repousser très loin (cf. [Figure 3.6.1.6-a]), j représente le jeu réel entre la structure étudiée et l'obstacle.

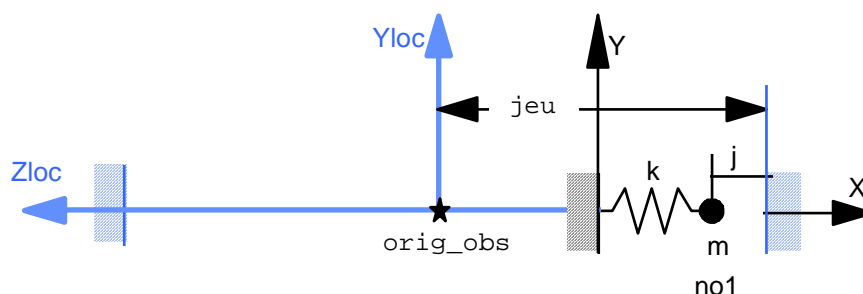


Figure 3.6.1.6-a : Système masse-ressort impactant une paroi fixe

Remarque :

Le mot-clé `JEU` n'est pas utilisé dans le cas de choc entre structures mobiles.

Les différents cas de jeux sont représentés dans la documentation de `DEFI_OBSTACLE` [U4.44.21].

3.6.1.7 Opérande ANGL_VRIL

◇ ANGL_VRIL = gamma

γ , angle en degrés définissant la position angulaire du repère local de l'obstacle dans son plan.

Par convention, la normale \mathbf{n} au plan de coupe de l'obstacle, NORM_OBST définit l'axe \mathbf{x}_{loc} du repère local.

On passe du repère global \mathbf{XYZ} au repère du plan de l'obstacle $\mathbf{n y_2 z_2}$ par un produit de deux rotations d'angles α autour de \mathbf{Z} puis β autour du transformé $\mathbf{y_1}$ de \mathbf{Y} .

La position de l'obstacle dans ce plan est obtenue par une rotation d'angle γ autour de la direction normale \mathbf{x}_{loc} (cf. [Figure 3.6.1.7-a]).

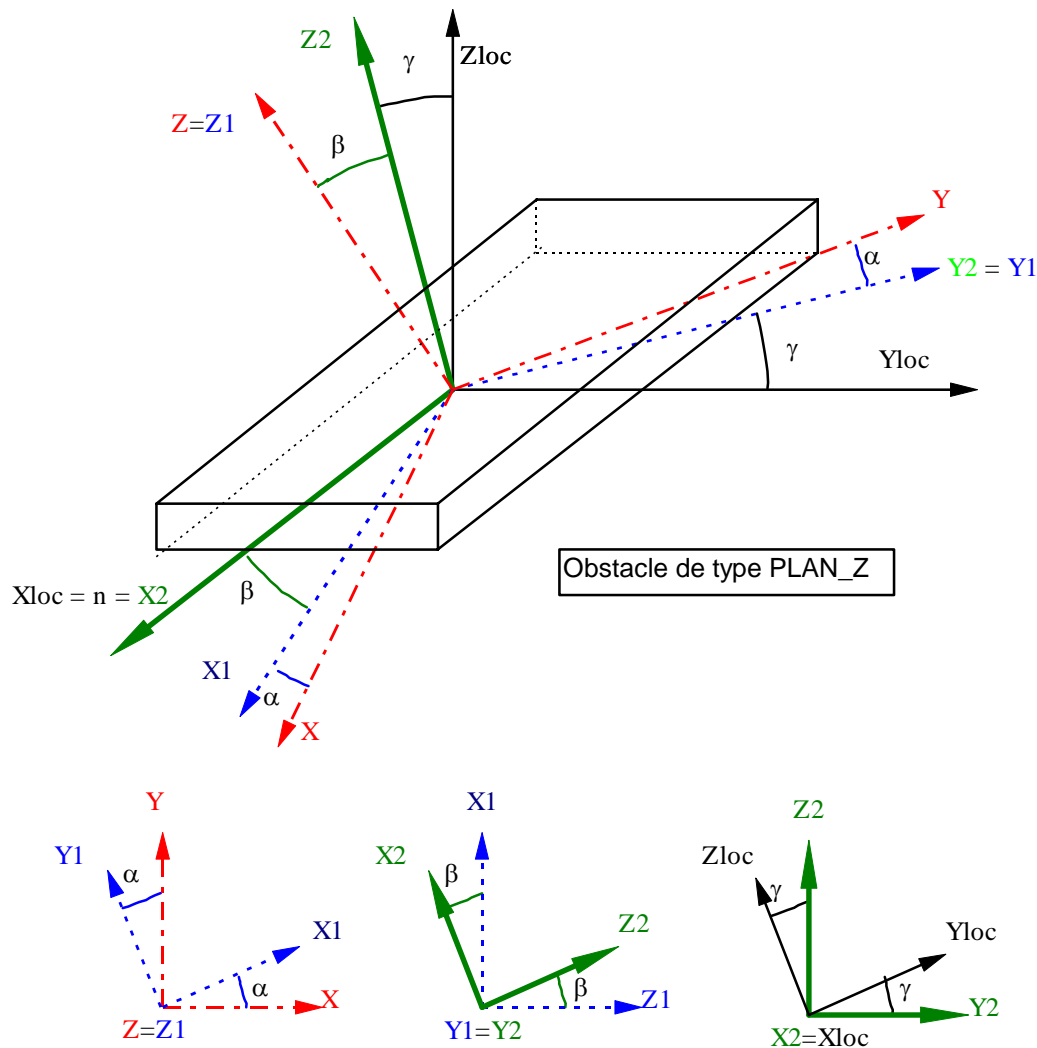


Figure 3.6.1.7-a : Rotations permettant de passer du repère global au repère local de l'obstacle.

Les angles α et β sont déterminés automatiquement à partir de la normale à l'obstacle \mathbf{n} . Le repère local \mathbf{X}_{loc} , \mathbf{Y}_{loc} , \mathbf{Z}_{loc} se déduit ensuite du repère \mathbf{n} , $\mathbf{y_2}$, $\mathbf{z_2}$ par rotation d'un angle de vrille γ ANGL_VRIL autour de \mathbf{n} .

Remarque :

- Si l'utilisateur ne précise rien, l'angle de vrille est calculé par le code dans le cas de chocs entre structures mobiles avec des obstacles de type BI_PLAN.
- En ce qui concerne les autres types d'obstacles, la valeur par défaut de gamma est zéro.

3.6.1.8 Opérandes DIST_1 / DIST_2

◇ DIST_1 = dist1

Distance caractéristique de matière entourant NOEUD_1 : no1 (ou GROUP_NO_1).
Opérande spécifique au contact entre deux structures mobiles.

◇ DIST_2 = dist2

Distance caractéristique de matière entourant NOEUD_2 : no2 (ou GROUP_NO_2).
Opérande spécifique au contact entre deux structures mobiles.

Remarques :

- *DIST_1 et DIST_2 sont définies au sens des normales sortantes des deux solides en vis-à-vis (DIST_1 et DIST_2 sont > 0 car elles représentent l'épaisseur des structures étudiées).*
- *Du fait du calcul de la distance normale de choc, la somme de DIST_1 et de DIST_2 doit être suffisamment grande par rapport à l'amplitude supposée du déplacement relatif des nœuds de chocs (cf. [R5.06.03]).*

3.6.1.9 Opérandes SOUS_STRUC_1 / SOUS_STRUC_2

◇ SOUS_STRUC_1 = ss1

Nom de la sous-structure qui contient le nœud de choc renseignant le mot clé NOEUD_1 (ou GROUP_NO_1).

◇ SOUS_STRUC_2 = ss2

Nom de la sous-structure qui contient le nœud de choc renseignant le mot clé NOEUD_2 (ou GROUP_NO_2).

3.6.1.10 Opérande REPERE

◇ REPERE = rep

Précise le repère dans lequel la position de l'obstacle est définie.

/ 'GLOBAL'

La position absolue de l'obstacle est définie indépendamment des rotations et translations auxquelles sont soumises les différentes sous-structures.

/ nom_sst

Nom d'une sous-structure.

La position et la normale de l'obstacle sont déterminées dans le repère utilisé pour définir les coordonnées des nœuds de la sous-structure nom_sst, la position et la normale finales de l'obstacle étant le résultat de la rotation et de la translation auxquelles est soumise la sous-structure.

3.6.1.11 Opérande RIGI_NOR

◆ RIGI_NOR = kn

Valeur de la rigidité normale de choc (unité N/m en USI).

3.6.1.12 Opérande AMOR_NOR

◇ AMOR_NOR = cn

Valeur de l'amortissement normal de choc (unité N m/s en USI).

3.6.1.13 Opérande RIGI_TAN

◆ RIGI_TAN = kt

Valeur de la rigidité tangentielle de choc (unité N/m en USI).

3.6.1.14 Opérande AMOR_TAN

◇ AMOR_TAN = ct

Valeur de l'amortissement tangentiel de choc (unité N m/s en USI).

Remarque :

Si une raideur k_t est spécifiée et que le mot clé AMOR_TAN est absent, le code calcule un amortissement optimisé de façon à minimiser les oscillations résiduelles en adhérence selon la formule :

$$c_t = 2\sqrt{(k_i + k_t)m_i} - 2\xi_i\sqrt{k_i m_i}$$

où i est l'indice du mode prépondérant dans la réponse de la structure.

3.6.1.15 Opérande COULOMB

◇ COULOMB = mu

Valeur du coefficient de frottement de COULOMB.

3.6.2 Non linéarités localisées de type lame fluide

Les opérands suivants sont spécifiques au calcul transitoire avec non-linéarité localisée de type lame fluide.

3.6.2.1 Opérands NMAX_ITER / RESI_RELA / LAMBDA

Dans ce cas, le système projeté prend la forme :

$$\Phi^t \cdot \mathbf{M} \cdot \Phi \cdot \ddot{\eta}_t + \Phi^t \cdot \mathbf{C} \cdot \Phi \cdot \dot{\eta}_t + \Phi^t \cdot \mathbf{K} \cdot \Phi \cdot \eta_t = \Phi^t \cdot \mathbf{F}_e(t) + \Phi^t \cdot \mathbf{F}_{fluide}(\Phi \cdot \eta_t, \Phi \cdot \dot{\eta}_t, \Phi \cdot \ddot{\eta}_t)$$

$\ddot{\eta}_t$ n'est donc pas donné de façon explicite en fonction de $\eta_t, \dot{\eta}_t$. Pour obtenir les accélérations généralisées, on utilise l'algorithme de point fixe suivant :

$\ddot{\eta}_t^0 = \ddot{\eta}_{t-1}$, $\eta_t, \dot{\eta}_t$ sont donnés. On répète jusqu'à convergence :

$$\ddot{\eta}_t^{i+1} = \left[\Phi^t \cdot (\mathbf{M} + \lambda \cdot \mathbf{M}_a) \cdot \Phi \right]^{-1} \cdot \left(\Phi^t \cdot \mathbf{F}_{fluide} + \lambda \cdot \Phi^t \cdot \mathbf{M}_a \cdot \Phi \cdot \ddot{\eta}_t^i + \Phi^t \cdot \mathbf{F}_e - \Phi^t \cdot \mathbf{C} \cdot \Phi \cdot \dot{\eta}_t^i - \Phi^t \cdot \mathbf{K} \cdot \Phi \cdot \eta_t^i \right)$$

où : \mathbf{M}_a représente la contribution diagonale de la matrice de masse ajoutée résultant de la lame fluide,

λ est un paramètre (supérieur à 1) utilisé pour garantir le caractère contractant des itérations de point fixe. Par défaut $\lambda = 10$.

La convergence est testée par $\|\ddot{\eta}_t^{i+1} - \ddot{\eta}_t^i\| < \varepsilon \cdot \|\ddot{\eta}_t^i\|$ où ε est le résidu relatif.

◇ NMAX_ITER = niter

Nombre maximum d'itérations de l'algorithme. Par défaut, niter = 20.

◇ RESI_RELA = residu

Résidu relatif, noté ε ci-dessus. Par défaut, $\varepsilon = 10^{-3}$.

◇ LAMBDA = lambda

Paramètre de convergence, noté λ ci-dessus. Par défaut, $\lambda = 10$.

3.6.2.2 Opérandes LAME_FLUIDE / ALPHA / BETA / CHI / DELTA du mot clé facteur CHOC

◇ LAME_FLUIDE = rep

Précise si l'interaction entre le nœud et l'obstacle ou entre les deux nœuds a lieu en présence d'une lame fluide. Par défaut, la liaison est supposée de type contact sec.

La force de réaction de la lame fluide [R5.06.05] prend la forme générale suivante :

$$\mathbf{F}_{\text{fluide}} = \alpha \cdot \left(\frac{\ddot{x}}{x+h} \right) + \beta \cdot \left(\frac{\dot{x}}{x+h} \right)^2 + \chi \cdot \frac{\dot{x}}{(x+h)^3} + \delta \cdot \frac{\dot{x} \cdot |\dot{x}|}{(x+h)^2}$$

où h est l'épaisseur de la lame fluide au repos.

◇ ALPHA, BETA, CHI, DELTA

Paramètres de la force de lame fluide.

3.7 Mot clé VERI_CHOC

Mot clé qui permet d'évaluer a posteriori, l'aptitude de la base modale à représenter correctement les impacts.

Si VERI_CHOC est présent, on calcule en chaque noeud de choc et pour chaque mode, le taux de

reconstitution de la solution statique : $t_s = K_{\text{statique}} \sum_{i=1}^n \frac{(\mathbf{T} \Phi_i \cdot \mathbf{F}_{\text{impo}})^2}{k_i}$ et, pour information, le taux de

reconstitution de l'effort tranchant : $t_N = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{T} \Phi_i \cdot \mathbf{F}_{\text{impo}}}{k_i} \cdot (\mathbf{T} \mathbf{F}_{\text{impo}} \cdot \mathbf{K} \cdot \Phi_i)$. On calcule ensuite les valeurs cumulées sur l'ensemble des modes qui constituent la base modale utilisée.

On vérifie que le rapport de la souplesse négligée (souplesse statique moins souplesse statique reconstituée) sur la souplesse de choc reste inférieur à la valeur donnée par l'opérande SEUIL (SEUIL vaut 0.5 par défaut) sinon :

- si STOP_CRITERE = 'OUI' on arrête l'exécution du programme (c'est le cas par défaut) ;
- si STOP_CRITERE = 'NON' on continue l'exécution du programme avec émission d'une alarme.

Remarques :

- Cette fonctionnalité n'est disponible que pour des obstacles de type plan ou bi_plan.
- Si le taux de reconstitution de la solution statique est inférieur à la valeur du seuil, on conseille à l'utilisateur de compléter la base modale par les modes locaux aux points de choc qui ont une souplesse locale importante.
- La formule n'est pas applicable en cas de modes statiques (matrice de rigidité non inversible). Le calcul se poursuit alors sans vérification des critères de choc et l'utilisateur en est averti.

3.8 Mot clé ANTI_SISM

Le mot clé ANTI_SISM est incompatible avec un calcul par sous-structuration dynamique. Il permet de calculer la force non linéaire qui existe si un dispositif anti-sismique est placé entre les deux noeuds antagonistes dont les noms sont précisés par les mots clés (NOEUD_1 ou GROUP_NO_1 et NOEUD_2 ou GROUP_NO_2) :

$$F_D = K_2 x + \frac{(K_1 - K_2) x}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_1 x}{P_y} \right)^2}} + C \operatorname{sign}(\dot{x}) \left| \dot{x} \frac{x}{x_{\max}} \right|^\alpha$$

- ◇ RIGI_K1, RIGI_K2, SEUIL_FX, C, PUIS_ALPHA et DX_MAX

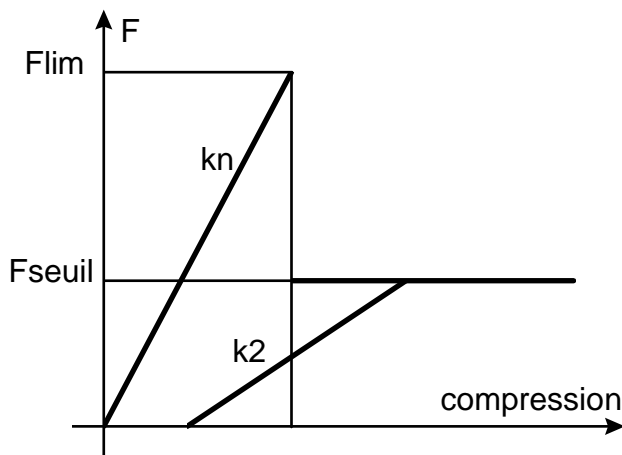
Paramètres de la force due à la présence d'un dispositif anti-sismique.

A titre d'exemple, les valeurs des paramètres pour un dispositif anti-sismique de type JARRET sont :

$K1 = 6. \text{ E}+06 \text{ N/m}$, $K2 = 0.53 \text{ E}+06 \text{ N/m}$, $Py = 1200.$, $C = 0.07 \text{ E}+05 \text{ Nm/s}$, $\alpha = 0.2$ et $x_{\max} = 0.03 \text{ m}$ (si le problème est posé en USI).

3.9 Mot clé FLAMBAGE

Ce mot clé est utilisé pour la détection de flambage éventuel et pour l'évaluation de la déformation résiduelle d'un élément lors d'un choc entre deux structures mobiles ou entre une structure mobile et une paroi fixe. La force de réaction lors d'un choc avec prise en compte du flambage peut être résumée par le schéma suivant :



On considère qu'il y a flambage si la force de réaction F atteint la valeur limite F_{lim} définie par l'utilisateur. La rigidité normale de choc après flambage $k2$ est ensuite différente de la rigidité avant flambage k_n .

Seuls les opérandes spécifiques au mot clé FLAMBAGE sont détaillés. Les autres mots clés permettent de définir les lieux de choc et sont identiques aux opérandes du mot clé CHOC.

- ◇ FNOR_CRIT = flim

Force normale limite qui entraîne le flambage de la structure.

- ◇ FNOR_POST_FL = fseuil

Force normale limite après flambage qui provoque une déformation résiduelle de la structure.

- ◇ RIGI_NOR_POST_FL = k2

Valeur de la rigidité normale après flambage.

Remarque :

Le calcul de choc avec flambage ne permet pas la prise en compte de la lame fluide et de l'amortissement de choc.

3.10 Mot clé RELA_EFFO_DEPL

- ◇ RELA_EFFO_DEPL

Mot clé facteur permettant de définir une relation force-déplacement ou moment-rotation sur un degré de liberté donné sous la forme d'une courbe non linéaire.

3.10.1 Opérande NOEUD

- ◆ NOEUD = no
Nom du nœud de la structure sur lequel porte la relation.

3.10.2 Opérande SOUS_STRUC

- ◇ SOUS_STRUC = ss
Nom de la sous-structure contenant le nœud renseignant l'opérande NOEUD.

3.10.3 Opérande NOM_CMP

- ◇ NOM_CMP = nomcmp
Nom de la composante du nœud de la structure sur laquelle porte la relation.

3.10.4 Opérande RELATION

- ◆ RELATION = f
Nom de la fonction non linéaire.
La relation non linéaire est définie à partir de la limite de comportement linéaire.

Remarque :

Contrairement au mot clé RELA_TRANSIS, il n'existe pas de limite linéaire, la fonction définie sous le mot clé RELATION est donc définie sur $]-\infty, +\infty[$.

L'équation d'équilibre, pour la structure modélisée, soumise à une accélération de sol horizontale \mathbf{a}_x dans la direction \mathbf{x} , et ayant des termes de correction provenant de non-linéarités s'écrit :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{a}_x + \mathbf{F}_c$$

où \mathbf{F}_c est la force corrective due à la non linéarité du sol. Elle peut être, par exemple, définie par la relation suivante (cf. cas test SDND103) :

$$F_c(x) = \frac{f(x_{\text{seuil}})}{x_{\text{seuil}}} - f(x) \text{ avec, si } x > x_{\text{seuil}}, f(x) = k_0 \left(1 - \frac{|x|}{x_0} \right) \cdot x.$$

Dans l'exemple ci dessus, on impose donc, sous l'opérande RELATION la fonction :

$$F_c(x) = \frac{k_0}{x_0} x \cdot [|x| - x_{\text{seuil}}].$$

3.11 Mot clé RELA_TRANSIS

- ◇ RELA_TRANSIS

Ce mot clé facteur a été introduit afin d'assurer une compatibilité avec les versions précédentes. Il correspond en fait au mot clé RELA_EFFO_DEPL de la version 4. Il permet donc, tout comme l'actuel mot clé RELA_EFFO_DEPL d'imposer une relation force - déplacement sur un degré de liberté d'un nœud donné sous la forme d'une fonction non linéaire. La relation non linéaire étant définie à partir de la limite de comportement linéaire.

Les opérands NOEUD, SOUS_STRUC, NOM_CMP et RELATION ont le même sens pour les mots clés RELA_EFFO_DEPL, RELA_TRANSIS et RELA_EFFO_VITE. Ils ne sont donc pas détaillés dans ce paragraphe.

3.12 Mot clé RELA_EFFO_VITE

◇ RELA_EFFO_VITE

Mot clé facteur permettant de définir une relation force-vitesse sur un degré de liberté d'un nœud donné sous la forme d'une fonction non linéaire.

Les opérandes NOEUD, SOUS_STRUC, NOM_CMP et RELATION ont le même sens pour les mots clés RELA_EFFO_DEPL, RELA_TRANSIS et RELA_EFFO_VITE. Ils ne sont donc pas détaillés dans ce paragraphe.

3.13 Réponse de systèmes mécaniques très faiblement amortis avec couplages fluidélastiques

On décrit ci dessous les mots clés spécifiques au calcul de la réponse de systèmes mécaniques linéaires très faiblement amortis avec couplages fluidélastiques associés éventuellement à des non-linéarités localisées aux nœuds de type chocs et frottements.

◇ METHODE = 'ITMI'

Ce schéma d'intégration par méthode intégrale permet, pour les systèmes faiblement amortis, d'obtenir une réponse exacte en tenant compte des variations de forces fluidélastiques obtenues en présence de chocs.

Remarques :

*Ce schéma d'intégration n'est pas utilisable en poursuite et ne permet pas le calcul par sous-structuration dynamique.
La présence du mot clé CHOC est impérative même pour des simulations de phases sans chocs dites 'phases de vol'.
La prise en compte de non-linéarités de type lame fluide n'a pas été introduite à ce jour dans le schéma d'intégration*

◇ BASE_ELAS_FLUI = meles

Base modale utilisée pour le calcul.

Concept de type melasflu produit par l'opérateur CALC_FLUI_STRU [U4.66.02] qui contient l'ensemble des bases modales calculées pour les différentes vitesses d'écoulement définies. Ce mot clé est obligatoire pour la méthode 'ITMI'.

◇ NUME_VITE_FLUI = Nvitf

Vitesse d'écoulement retenue pour le calcul (numéro d'ordre).

Permet d'extraire dans le concept melasflu la base modale correspondant à la vitesse d'écoulement retenue (cf. [U4.66.02]). Ce mot clé est obligatoire pour la méthode 'ITMI'.

◇ ETAT_STAT =

Pour les systèmes très faiblement amortis, cette option permet d'éviter un calcul coûteux de la phase linéaire précédant le premier choc. Cette phase, appelée par la suite « phase transitoire » précède l'établissement d'un régime constitué d'une succession de phases non linéaires de chocs et/ou de phases linéaires dites de « vol » selon les fonctions d'excitation du système mécanique appliquées. Le temps de transitoire correspond à un déplacement égal au jeu d'une butée. Il peut être relativement important (50 à 100 secondes).

ETAT_STAT = 'OUI' : permet le passage en un seul pas de temps de calcul de la phase transitoire.

Le passage de la phase transitoire est réalisé en supposant le système mécanique en “vol”. Le temps nécessaire au passage du transitoire est estimé par l'algorithme en fonction des caractéristiques mécaniques du système en “vol”. Cette estimation est basée sur un critère où interviennent le paramètre `PREC_DUREE` et les durées d'excitations dues aux efforts turbulents.

Remarque :

Si l'on demande une simulation avec calcul en un pas de temps de la phase transitoire, il faudra veiller à introduire une durée d'excitation suffisamment longue. Cette durée doit correspondre à la durée nécessaire au passage du transitoire augmentée de la durée de simulation en régime établi souhaitée. Cette durée totale de simulation sera renseignée via les deux opérands `INST_INIT` et `INST_FIN` sous le mot clé facteur `INCREMENT`.

`ETAT_STAT = 'NON'` : La simulation ne distingue pas l'état transitoire du régime établi.

◇ `PREC_DUREE = prec`

Permet de définir la précision choisie pour déterminer la durée de la phase transitoire selon la formule :

$$T_{tr} = \frac{-\ln(\text{prec})}{2\xi_0\omega_0}$$
 où ξ_0 et ω_0 désignent respectivement l'amortissement réduit et la pulsation de chaque mode considéré. La valeur par défaut de ce paramètre est 1%.

◇ `CHOC_FLUI =`

Détermine le traitement réalisé par l'algorithme pendant les phases de choc vis à vis des forces fluidélastiques.

Par défaut, la variation des forces fluidélastiques en phase de choc liée à la modification de la rigidité et de l'amortissement du système mécanique (impact sur la butée) n'est pas prise en compte.

◇ `NB_MODE = Nmode`

Nombre de modes de la base modale retenus pour le calcul dynamique.

Les modes conservés correspondent à des fréquences croissantes (premiers modes). Si `NB_MODE` n'est pas précisé, on prend tous les modes de la base modale du concept de type `melasflu`.

◇ `NB_MODE_FLUI = Nmodef`

Nombre de modes de la base modale perturbés par les phénomènes de couplage fluidélastiques en phase de choc (inférieur au nombre de modes retenus pour le calcul dynamique).

Les modes conservés correspondent aux `Nmodef` premières fréquences croissantes (premiers modes). Si `NB_MODE_FLUI` n'est pas précisé, on prend le nombre de modes retenus pour le calcul dynamique.

◇ `TS_REG_ETAB = tsimu`

Durée de la simulation souhaitée.

Dans le cas d'une simulation sans calcul préalable et en un pas de temps de la phase transitoire (`ETAT_STAT = 'NON'`), cette durée correspond à la durée de simulation quel que soit l'état du système entre les instants de début et de fin de simulation. Par conséquent on devra s'assurer que : `TS_REG_ETAB ≤ INST_FIN - INST_INIT`

Par défaut, on aura `TS_REG_ETAB = INST_FIN - INST_INIT`

Dans le cas d'une simulation avec calcul de la phase transitoire (`ETAT_STAT = 'OUI'`), cette durée correspond à la durée de simulation réellement souhaitée lorsque la phase de chocs est établie du point de vue numérique. Par conséquent on devra s'assurer que :

`TS_REG_ETAB ≤ INST_FIN - INST_INIT - “temps estimé transitoire”`

Dans le cas où cette dernière condition n'est pas respectée, l'utilisateur en est informé avec précision du temps minimum d'excitation requis pour son calcul `INST_FIN - INST_INIT`.

Par défaut, on a : `TS_REG_ETAB = INST_FIN - INST_INIT - “temps estimé transitoire”`

3.14 Mot clé ARCHIVAGE

◇ ARCHIVAGE

Mot clé facteur définissant l'archivage.

3.14.1 Opérande LIST_ARCH

- Méthodes 'EULER', 'DEVOGE', 'NEWMARK' :

◆ / LIST_ARCH = l_arch

Liste d'entiers définissant les instants de calcul pour lesquels la solution doit être archivée dans le concept résultat tran_gene.

3.14.2 Opérande PAS_ARCH

◇ PAS_ARCH = ipa

- Méthodes 'EULER', 'DEVOGE', 'NEWMARK', 'ITMI' :
Entier définissant la périodicité d'archivage de la solution du calcul transitoire dans le concept résultat tran_gene.

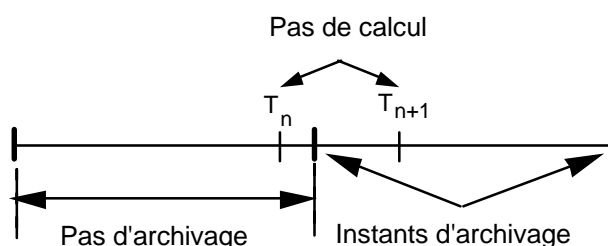
Si ipa = 5 on archive tous les 5 pas de calcul.

Quelle que soit l'option d'archivage choisie, on archive le dernier pas de temps et tous les champs associés pour permettre une éventuelle reprise.

Par défaut on archive tous les pas de calcul.

- Méthode 'ADAPT' :
Entier qui permet de calculer l'intervalle entre deux instants d'archivage dans le concept résultat, égal à PAS_ARCH * PAS. Avec cette convention, le pas d'archivage est toujours supérieur ou égal au pas maximal utilisé par le calcul.

Avec un pas variable, les instants d'archivage ne correspondent pas exactement à des pas de calcul. L'algorithme archive donc les grandeurs aux pas de calcul les plus proches des instants d'archivage indiqués par l'utilisateur (en T_n sur ce schéma) :



3.15 Opérande INFO

◇ INFO = imp

Entier permettant de préciser le niveau d'impression dans le fichier MESSAGE.

Si INFO : 1, on imprime les informations suivantes dans le fichier MESSAGE :

<I> <nom de la routine où sont écrites les informations suivantes>

Si <I> <MDTR74>, on rappelle que c'est un calcul transitoire sur base modale "classique",
 sinon <I> <SSDT74> c'est un calcul transitoire sur base modale par sous-structuration
 dynamique.

----->

CALCUL PAR SUPERPOSITION MODALE

! LA BASE DE PROJECTION EST UN >type de la base de projection<

! LE NB D'EQUATIONS EST : nb

! LA METHODE UTILISEE EST : >nom de la méthode d'intégration <

! LA BASE UTILISEE EST : >nom de la base modale <

! LE NB DE VECTEURS DE BASE EST : nbv

! LE PAS DE TEMPS INITIAL EST : valeur du pas de temps initial

(uniquement si méthode ADAPT demandée)

Titre : *Opérateur DYNA_TRAN_MODAL*
Auteur(s) : **E. BOYERE**

Date : 12/06/07
Clé : U4.53.21-H Page : 26/28

```
! LE PAS DE TEMPS DU CALCUL EST      : valeur du pas de temps de calcul
! LE NB DE PAS DE CALCUL EST         : nbc
! LE NB DE PAS D'ARCHIVE EST         : nba
! LE NOMBRE DE LIEU(X) DE CHOC EST   : nbchoc
! LE NOMBRE DE RELA_EFFO_DEPL EST    : nbrelaed
                                     (uniquement si le nombre de relations est non nul)
! LE NOMBRE DE RELA_EFFO_VITE EST    : nbrelaev
                                     (uniquement si le nombre de relations est non nul)
```

Si INFO : 2, on imprime, en plus des informations écrites dans le cas où INFO vaut 1, les informations suivantes dans le fichier MESSAGE :

Pour chaque obstacle :

- Le numéro et type de l'obstacle ;
- Le nom et les coordonnées dans le repère global du noeud de choc (des noeuds de choc dans le cas d'un choc entre structures mobiles) ;
- L'orientation, dans le repère global, de la normale à l'obstacle ;
- La valeur de l'angle de vrille ;
- La valeur du jeu initial ;

Et pour chaque noeud de choc et pour chaque mode, le numéro du mode, les valeurs des raideurs locales de choc et du taux de flexibilité locale et de la souplesse locale.

On imprime également à la fin, pour chaque noeud de choc :

```
TAUX DE RESTIT FLEXIBILITE : 9.9539E-01 soit 99.53% de souplesse locale ;
TAUX DE RESTIT EFFORT TRANCHANT : 1.8979E-02 soit 1.89% de l'effort tranchant.
```

On imprime ces quantités globalement pour l'ensemble des modes et pour chaque mode.

On imprime en outre :

- pour chaque noeud de choc, les rapports souplesse locale sur souplesse de choc et souplesse statique moins souplesse locale sur souplesse de choc,
- pour chaque mode, sa participation sur les déformées statique aux noeuds de choc. Elle vaut le rapport du nombre de conditionnement de la matrice fermée par le vecteur modal et les déformées statiques sur le nombre de conditionnement de la matrice des déformées statiques.

3.16 Opérande IMPRESSION

◇ IMPRESSION

Mot clé facteur qui permet d'imprimer dans le fichier RESULTAT des grandeurs, non imprimables par un opérateur d'impression, telles que le déplacement local, la vitesse locale, les forces de contact aux noeuds de choc et la valeur cumulée sur tous les modes de la base modale de projection du taux de reconstitution de la solution statique.

3.16.1 Opérandes TOUT / NIVEAU

Le mot clé NIVEAU permet d'imprimer un ou plusieurs tableau(x) parmi 'DEPL_LOC', 'VITE_LOC', 'FORC_LOC' et 'TAUX_CHOC'. Avec TOUT = 'OUI' (valeur par défaut), on imprime les quatre tableaux.

3.16.2 Opérandes INST_INIT / INST_FIN

Ces deux mots clés permettent à l'utilisateur de filtrer les impressions dans chaque boucle sur les pas de temps.

3.17 Opérande TITRE

◇ TITRE = titre

Titre de la structure de données résultat [U4.03.01].

4 Phase d'exécution

4.1 Vérification sur les matrices

Dans le cas d'un calcul par recombinaison modale, on vérifie que les matrices généralisées sont bien issues d'une projection sur une base commune et avec le même nombre de vecteurs de base. Dans le cas d'un calcul par sous-structuration dynamique, on vérifie que les matrices généralisées sont bien issues de la même numérotation généralisée.

4.2 Vérification et conseil sur le choix du pas de temps pour les schémas EULER, DEVOGE et NEWMARK :

On s'assure que le pas de temps choisi vérifie les conditions de stabilité du schéma numérique (critère de CFL) :

- dans le cas de NEWMARK, la stabilité est toujours assurée mais le dépassement du critère peut induire un manque de précision sur le résultat et est signalé par un message ; le calcul se poursuit (au risque de produire un résultat peu précis ou faux).
- dans le cas des schémas d'EULER et DEVOGE, si l'opérande VERI_PAS vaut 'OUI' (valeur par défaut), l'exécution est arrêtée, un pas de temps minimum est proposé. Si l'opérande VERI_PAS vaut 'NON' ou s'il s'agit du schéma ADAPT, un message d'alarme est émis et le calcul se poursuit (au risque de produire un résultat peu précis ou faux).

Dans une analyse transitoire sans non-linéarité, il faut veiller à ce que le pas de temps soit tel que :

$$\begin{aligned} dt &< 0,1/f_n \text{ pour NEWMARK et DEVOGE} \\ dt &< 0,05/f_n \text{ pour EULER} \end{aligned}$$

f_n étant la fréquence la plus élevée des modes de la base modale considérée.

Remarque :

On mentionne qu'avec des non linéarités localisées le pas de temps choisi doit être parfois très inférieur à cette valeur conseillée.

4.3 Phase d'exécution pour la méthode 'ADAPT' :

L'exécution est interrompue lorsque le pas de temps atteint un pas minimal égal à PAS X PAS_LIMI_RELA.

Remarques :

Le schéma des différences centrées ne restitue pas de façon exacte les pulsations propres d'un système, ce qui conduit à d'importantes erreurs de calcul dans les deux cas suivants :

- Calcul d'un très grand nombre de périodes d'oscillations libres ;
- Calcul des oscillations d'un système très faiblement amorti ($\xi < 10^{-3}$) excité sur une fréquence de résonance.

Dans ces deux cas, il est souvent nécessaire d'augmenter le paramètre NB_POIN_PERIODE.

La méthode 'ADAPT' peut être utilisée en sous-structuration.

Le pas de temps peut être récupéré par l'opérateur RECU_FONCTION, avec la syntaxe suivante :

```
pas = RECU_FONCTION (
    RESU_GENE = dynamoda
    NOM_CHAM = PTEM
    ....)
```

Pour plus de clarté, c'est en fait le logarithme décimal du pas de temps qui est stocké dans le concept résultat de RECU_FONCTION.

4.4 Phase d'exécution pour la méthode 'ITMI'

L'exécution est interrompue :

- lorsque la durée d'excitation choisie par l'utilisateur est incompatible avec le temps de simulation souhaité (régime établi + simulation après obtention du régime établi). Dans ce cas, l'utilisateur en est informé avec précision du temps minimum d'excitation requis pour son calcul,
- lorsque l'algorithme ne réussit pas à trouver une solution convergée lors de la diagonalisation de la matrice de raideur,
- lorsque les phases de transition vol/choc ne peuvent être déterminées avec une précision suffisante.