
Macro-commande CALC_MODAL

1 But

Lancer dans une seule commande l'intégralité de la chaîne de calcul de modes propres :

- 1.CALC_MATR_ELEM (options 'RIGI_MECA', 'MASS_MECA' et 'AMOR_MECA');
- 2.NUME_DDL;
- 3.ASSE_MATRICE;
- 4.MODE_ITER_SIMULT.

Cette macro-commande a pour but d'offrir aux utilisateurs un outil simple et convivial pour le calcul des modes propres d'une structure solide sans interaction fluide et seulement pour les modes « dynamiques » et non pas pour ceux de flambement. Pour l'instant le calcul de la matrice de rigidité est limité au cas des matrices symétriques.

Produit une seule structure de données de type `mode_meca` si pas de matrice d'amortissement présente ou `mode_meca_c` si matrice d'amortissement présente. Le choix de la présence de l'amortissement se fait avec le mot clé `AMORTISSEMENT`.

2 Syntaxe

```
mod_meca = CALC_MODAL (

    ◆ MODELE = mo , [modele]
    ◇ AMORTISSEMENT = / 'NON' [DEFAULT]
                    / 'OUI'

    ◆ CHAM_MATER = chmat, [cham_mater]
    ◇ CHARGE = char , [char_meca]
    ◇ CARA_ELEM = caract , [cara_elem]
    ◇ INST = / tps, [R]
            / 0.0, [DEFAULT]

    ◇ METHODE = / 'TRI_DIAG'
                ◇ PREC_ORTHO = / 1.E-12, [DEFAULT]
                  / po, [R]
                ◇ NMAX_ITER_ORTHO = / 5, [DEFAULT]
                  / nio, [I]
                ◇ PREC_LANCZOS = / 1.E-8, [DEFAULT]
                  / pl, [R]
                ◇ NMAX_ITER_QR = / 30, [DEFAULT]
                  / nim, [I]
                / 'JACOBI'
                ◇ PREC_BATHE = / 1.E-10, [DEFAULT]
                  / pbat, [R]
                ◇ NMAX_ITER_BATHE = / 40, [DEFAULT]
                  / nbat, [I]
                ◇ PREC_JACOBI = / 1.E-2, [DEFAULT]
                  / pjaco, [R]
                ◇ NMAX_ITER_JACOBI = / 12, [DEFAULT]
                  / njaco, [I]

                / 'SORENSEN' [DEFAULT]
                ◇ PREC_SOREN = / 0, [DEFAULT]
                  / pso, [R]
                ◇ NMAX_ITER_SOREN = / 20, [DEFAULT]
                  / nso, [I]
                ◇ PARA_ORTHO_SOREN = / 0.717, [DEFAULT]
                  / porso, [I]

                / 'QZ'
                ◇ TYPE_QZ = / 'QZ_SIMPLE', [DEFAULT]
                  / 'QZ_QR',
                  / 'QZ_EQUI',

    ◇ MODE_RIGIDE = / 'OUI',
                  / 'NON', [DEFAULT]
```

```

    ◇ CALC_FREQ = _F (
      ◇ OPTION = / 'CENTRE'
          ◇   FREQ = l_f [l_R]
          ◇   AMOR_REDUIT = l_a [l_R]
          ◇   NMAX_FREQ = / 10 [DEFAULT]
          / nf [I]
      / 'BANDE'
          ◇   FREQ = l_f [l_R]
      / 'PLUS_PETITE' [DEFAULT]
          ◇   NMAX_FREQ = / 10 [DEFAULT]
          / nf [I]
      / 'PLUS_GRANDE' [DEFAULT]
          ◇   NMAX_FREQ = / 1 [DEFAULT]
          / nf [I]

      ◇ APPROCHE = / 'REEL' [DEFAULT]
          / 'IMAG'
          / 'COMPLEXE'

      ◇ /DIM_SOUS_ESPACE = dse [I]
      /COEF_DIM_ESPACE = mse [I]
      ◇ PREC_SHIFT = / 0.05 [DEFAULT]
          / ps [R]
      ◇ NMAX_ITER_SHIFT = / 3 [DEFAULT]
          / ns [I]
      ◇ SEUIL_FREQ = / 1.E-2 [DEFAULT]
          / sf [R]
      ◇ STOP_BANDE_VIDE = / 'OUI' [DEFAULT]
          / 'NON'

      )

    ◇ VERI_MODE = _F (
      ◇ STOP_ERREUR = / 'OUI' [DEFAULT]
          / 'NON'

      ◇ SEUIL = / rseuil [R]
          / 1.E-6 [DEFAULT]
      ◇ STURM = / 'OUI' [DEFAULT]
          / 'NON' [l_Kn]
      ◇ PREC_SHIFT = / pshif [R]
          / 0.005 [DEFAULT]

      )

    ◇ INFO = / 1 [DEFAULT]
          / 2

    ◇ TITRE = titre

  )

```

3 Opérandes

3.1 Opérande MODELE

Cet opérande sert à indiquer les éléments finis qui constituent la structure dont on calcule les modes propres. On rappelle que les éléments finis sont pour la plupart définis dans le modèle.

Il y a deux exceptions :

- Les éléments de dualisation des conditions de DIRICHLET, c'est-à-dire les éléments permettant d'imposer des conditions sur les degrés de liberté de déplacement en mécanique.
- Les éléments de chargement nodal.

Ces éléments sont définis dans un concept de type `char_meca`.

Si on est dans un cas parmi les deux présentés ci-dessus, on doit fournir le concept `char_meca` correspondant pour le calcul des matrices élémentaires de rigidité avec l'option `RIGI_MECA`.

◇ `INST = tps`

L'argument `tps` est utilisé lorsque les caractéristiques matérielles ou les chargements dépendent du temps. Un cas assez fréquent est celui d'un matériau mécanique dépendant de la température qui elle-même dépend du temps.

3.2 Mot clé AMORTISSEMENT

Ce mot clé permet la prise en compte de l'amortissement. Si il est renseigné 'OUI', alors les matrices élémentaires d'amortissement seront calculées avec l'option 'AMOR_MECA'.

3.3 Opérande CHAM_MATER

Nom du champ de matériau où sont définies les caractéristiques des matériaux des éléments.

3.4 Opérande CARA_ELEM

Les caractéristiques élémentaires sont nécessaires s'il existe dans le modèle des éléments de poutre, coque ou des éléments discrets ou si un repère d'anisotropie a été défini sur des éléments massifs (mot clé `MASSIF` de la commande `AFFE_CARA_ELEM`).

3.5 Opérande CHARGE

Cet opérande est à préciser si on a des éléments pour lesquels sont faits les calculs élémentaires de rigidité (conditions de `DIRICHLET`).

3.6 Opérande INST

L'argument `tps` est utilisé lorsque les caractéristiques matérielles ou les chargements dépendent du temps. Un cas assez fréquent est celui d'un matériau mécanique dépendant de la température qui elle-même dépend du temps.

3.7 Mot clé METHODE

Quatre méthodes de résolution sont disponibles pour le problème aux valeurs propres

La méthode IRA (dite de Sorensen), permet de traiter les deux types de problèmes généralisé et quadratique. Elle est la méthode par défaut et est basée sur :

- l'obtention d'une matrice de Hessenberg en utilisant une factorisation de type Arnoldi
- le calcul des valeurs propres de ce problème projeté par une méthode QR
- un certain nombre de redémarrages permettant d'affiner les valeurs propres cherchées par l'utilisateur, les autres valeurs propres nécessaires à la méthode servant de valeurs auxiliaires.

La méthode de Lanczos, permet de traiter les deux types de problèmes généralisé et quadratique. Elle est basée sur :

- l'obtention d'une matrice tridiagonale projetée via la méthode de Lanczos,
- la résolution du système tridiagonal réduit par une méthode **QR**,

La méthode itérative de Bathe et Wilson valable seulement pour le problème généralisé, est basée sur :

- la construction à chaque itération d'un problème généralisé projeté de plus petite taille,
- le calcul des valeurs propres de ce problème projeté par une méthode de Jacobi.

La méthode QZ

◇ METHODE = / 'SORENSEN' [DEFAULT]

On utilise la méthode de Sorensen (cf. [§5] [R5.01.01]) pour calculer les valeurs et vecteurs propres du problème généralisé ou quadratique. Prendre en compte aussi l'effet gyroscopique.

◇ / 'TRI_DIAG'

On utilise la méthode de Lanczos (puis la méthode **QR** sur le système projeté) pour calculer les valeurs et vecteurs propres du problème généralisé ou quadratique (cf. [§4] [R5.01.01]).

◇ / 'JACOBI'

On utilise la méthode de Bathe & Wilson (cf. [§6] [R5.01.01]) (puis la méthode de Jacobi sur le système projeté) pour calculer les valeurs et vecteurs propres du problème généralisé. Cette option ne peut pas être utilisée pour un problème quadratique.

◇ / 'QZ'

On utilise la méthode QZ pour traiter les problèmes modaux quadratiques prenant en compte l'effet gyroscopique des structures tournantes. Les matrices de masse, rigidité et amortissement peuvent être non-symétriques.

3.7.1 Opérandes d'IRAM (si METHODE = 'SORENSEN')

◇ PREC_SOREN = pso (0.) [DEFAULT]

Remarque :

La méthode considère alors qu'elle doit travailler avec la plus petite précision possible, le « zéro machine ». Pour en avoir un ordre de grandeur, en double précision sur les machines standards, cette valeur est proche de $2.22 \cdot 10^{-16}$

◇ NMAX_ITER_SOREN = nso (20) [DEFAULT]

◇ PARA_ORTHO_SOREN = porso (0.717) [DEFAULT]

Il s'agit de paramètres d'ajustement de la précision requise sur les modes (par défaut, la précision machine est choisie), du nombre de redémarrages autorisé de la méthode de Sorensen (cf. [§5.4.2] et [§6.4] [R5.01.01]) et du coefficient d'orthogonalisation de l'IGSM de Kahan-Parlett (cf. [§11.4] [R5.01.01]).

Remarque :

Lors des premiers passages, il est fortement conseillé de ne pas modifier ces paramètres qui concernent plutôt les arcanes de l'algorithme et qui sont initialisés empiriquement à des valeurs standards.

3.7.2 Opérandes de la méthode de Lanczos (si METHODE = 'TRI_DIAG')

◇	PREC_ORTHO	=	po	(1.10 ⁻¹²)	[DEFAULT]
◇	NMAX_ITER_ORTHO	=	nio	(5)	[DEFAULT]
◇	PREC_LANCZOS	=	pl	(1.10 ⁻⁸)	[DEFAULT]
◇	NMAX_ITER_QR	=	nim	(30)	[DEFAULT]

Les deux premiers paramètres permettent, respectivement, d'ajuster la précision d'orthogonalisation et le nombre de réorthogonalisations dans la méthode de Lanczos pour obtenir des vecteurs indépendants engendrant le sous-espace (cf. [§5.5.1] [R5.01.01]).

Le troisième est un paramètre d'ajustement pour déterminer la nullité d'un terme sur la surdiagonale de la matrice tridiagonale caractérisant le problème réduit obtenu par la méthode de Lanczos. C'est juste un critère de déflation et non, contrairement à ce que pourrait laisser croire son nom, un critère de qualité des modes (cf. [§5.4.1] [R5.01.01]).

Le dernier fixe le nombre d'itérations maximum pour la résolution du système réduit par la méthode QR ([§5.5.2] et [§10] [R5.01.01]).

Remarque :

Lors des premiers passages, il est fortement conseillé de ne pas modifier ces paramètres qui concernent plutôt les arcanes de l'algorithme et qui sont initialisés empiriquement à des valeurs standards.

3.7.3 Opérandes de la méthode de Bathe & Wilson (si METHODE = 'JACOBI')

◇	PREC_BATHE	=	pbat	(1.10 ⁻¹⁰)	[DEFAULT]
◇	NMAX_ITER_BATHE	=	nbat	(40)	[DEFAULT]
◇	PREC_JACOBI	=	pjaco	(1.10 ⁻²)	[DEFAULT]
◇	NMAX_ITER_JACOBI	=	njaco	(12)	[DEFAULT]

Les deux premiers paramètres permettent, respectivement, d'ajuster la précision de convergence et le nombre maximum d'itérations permises de la méthode de Bathe & Wilson (cf. [§7] [R5.01.01]).

Les deux autres permettent d'ajuster la précision de la convergence et le nombre maximum d'itérations permises par la méthode de JACOBI (cf. [§12] [R5.01.01]) qui permet d'exhumer les modes propres de la matrice projetée par la méthode précédente.

Remarque :

Lors des premiers passages, il est fortement conseillé de ne pas modifier ces paramètres qui concernent plutôt les arcanes de l'algorithme et qui sont initialisés empiriquement à des valeurs standards.

3.7.4 Opérandes de la méthode QZ (si METHODE = 'QZ')

◇	TYPE_QZ	=	/ 'QZ_SIMPLE',	[DEFAULT]
			/ 'QZ_QR',	
			/ 'QZ_EQUI',	

- 'QZ_SIMPLE' , algorithme QZ 'standard',
- 'QZ_EQUI' , idem mais on rajoute un pré-traitement d'équilibrage des termes des matrices. Cela améliore souvent la qualité des modes, mais *a contrario* , si les matrices présentent des termes très petits dus à des erreurs d'arrondis, cette phase engendre des modes parasites.
- 'QZ_QR' , algorithme QR plus rapide mais au périmètre plus restreint.

Les deux premières variantes peuvent être employées pour les problèmes généralisées et quadratiques avec ou sans matrice hystérétique/effet gyroscopique. La troisième est à réserver aux problèmes dynamiques, sans amortissement, ni effet gyroscopique et n'utilisant pas de Lagrange de

blocage ou de liaison. La méthode QZ va calculer tous les modes associés à des ddls physiques (ddls non bloqués et sans les Lagranges) et le paramétrage usuel de l'opérateur va permettre à l'utilisateur d'en faire le tri (option 'BANDE', 'CENTRE', 'PLUS_PETITE').

3.8 Mot clé MODE_RIGIDE

Mot-clé utilisable seulement avec la méthode de Lanczos pour un problème modal généralisé. Il permet de détecter et de calculer au préalable, par une méthode algébrique les modes de corps de rigide (modes associés à une fréquence propre nulle) (cf. [§5.5.4] [R5.01.01]). Ils sont utilisés par la suite pour calculer les autres modes avec l'algorithme de Lanczos. Ils sont fournis à l'utilisateur seulement s'ils font partie des modes demandés. Si les modes de corps rigide sont calculés sans utiliser cette option, les fréquences propres calculées par l'algorithme de Lanczos ne sont pas nulles mais très voisines de zéro.

3.9 Mot clé CALC_FREQ

◇ CALC_FREQ = _F(...

Mot-clé facteur pour la définition des paramètres de calcul des fréquences propres et de leur nombre.

3.9.1 Opérande OPTION

◇ OPTION =

'BANDE'	On recherche toutes les fréquences propres dans une bande donnée. Cette bande est définie par l'argument de <code>FREQ</code> : $(f_1 f_2)$.
'CENTRE'	Cette option n'est pas utilisable avec un problème modal quadratique. On recherche les <code>NMAX_FREQ</code> fréquences propres les plus proches de la fréquence <code>f</code> (argument du mot-clé <code>FREQ</code> : <code>f</code>).
'PLUS_PETITE' [DÉFAUT]	On recherche les <code>NMAX_FREQ</code> plus petites fréquences propres.
'PLUS_GROSSE'	On recherche les <code>NMAX_FREQ</code> plus grandes fréquences propres. Les rôles des matrices de rigidité et de masse sont intervertis de manière transparente pour l'utilisateur. Rq : il peut être utile de débrancher le test de STURM dans l'opérande <code>VERI_MODE</code> . En effet, au cœur de l'algorithme, avant d'être converties en fréquences propres physiques, les valeurs propres peuvent être très petites et très proches.

Voir [§2.9] et [§4.4] [R5.01.01].

3.9.2 Opérande APPROCHE

◇ APPROCHE = / 'REEL' [DÉFAUT]
/ 'IMAG'
/ 'COMPLEXE'

Ce mot-clé définit le type d'approche (réelle, imaginaire ou complexe) pour le choix du pseudo-produit scalaire du problème quadratique(cf. [§5.5.2] [R5.01.02]). En général la valeur par défaut (réel) est valide.

Cet opérande n'a de sens que pour l'analyse des vibrations libres d'une structure amortie .

3.9.3 Opérande FREQ

◇ FREQ = l_f

Liste des fréquences (ne peut être utilisé que si `TYPE_RESU` = 'DYNAMIQUE') : son utilisation dépend de l'OPTION choisie.

OPTION = 'BANDE'	On attend deux valeurs $(f_1 f_2)$ qui définissent la bande de recherche,
OPTION = 'CENTRE'	On attend une seule valeur de fréquence,

Les valeurs stipulées sous ce mot-clé doivent être positives.

3.9.4 Opérande AMOR_REDUIT

◇ AMOR_REDUIT = l_a

Valeur de l'amortissement réduit qui permet de définir la valeur propre complexe autour de laquelle on cherche les valeurs propres les plus proches.

OPTION = 'CENTRE'

On attend une seule valeur d'amortissement réduit,

La valeur stipulée sous ce mot-clé doit être positive et être comprise entre 0 et 1.

3.9.5 Opérande NMAX_FREQ

◇ NMAX_FREQ = nf (10 si OPTION='PLUS_PETITE', 1 si OPTION='PLUS_GRADE')
[DEFAULT]

Nombre maximum de fréquences propres à calculer.

Ce mot-clé est ignoré avec l'option 'BANDE' car on calcule alors toutes les fréquences propres contenues dans la bande stipulée.

3.9.6 Opérande DIM_SOUS_ESPACE

◇ / DIM_SOUS_ESPACE = des
/ COEF_DIM_ESPACE = mse

Si le mot-clé DIM_SOUS_ESPACE n'est pas renseigné ou est initialisé à une valeur strictement inférieure au nombre de fréquences demandées nf, l'opérateur calcule automatiquement une dimension admissible pour le sous-espace de projection (cf. [§5.2] de ce document et [§4.3], [§5.5.2], [§6.5.3], [§7.3.1] [R5.01.01]) à l'aide COEF_DIM_ESPACE.

Grâce à la donné de ce facteur multiplicatif, mse, on peut projeter sur un espace dont la taille est proportionnelle au nombre de fréquences contenues dans l'intervalle d'étude.

Remarques :

- Si on utilise la méthode de Sorensen (IRAM) et que $ndim - nf < 2$, des impératifs numériques forcent à imposer $ndim = nf + 2$.
- En quadratique on travaille sur un problème réel de taille double : $2 \times nf$, $2 \times ndim$.

3.9.7 Opérandes SEUIL_FREQ, PREC_SHIFT et NMAX_ITER_SHIFT

◇ PREC_SHIFT = ps (0.05) [DEFAULT]
◇ SEUIL_FREQ = sf (0.01) [DEFAULT]
◇ NMAX_ITER_SHIFT = ns (3) [DEFAULT]

Pour les trois options possibles 'PLUS_PETITE', 'BANDE' ou 'CENTRE', on effectue une factorisation LDL^T de la matrice $(A - (2\pi f_*)^2 B)$. f_* dépend de la méthode utilisée. Si f_* est détectée comme étant une fréquence propre ou étant située à proximité de fréquences propres (perte de plus de $ndeci=8$ décimales lors de la factorisation des matrices), la fréquence f_* est alors modifiée (cf. [§2.6] et [§2.9] [R5.01.01]):

$$f_*^- = f_* \times (1 - ps) \text{ ou } f_*^+ = f_* \times (1 + ps)$$

Dans le cas où $(A - (2\pi f_*)^2 B)$ est non factorisable LDL^T et $(|f_*| \leq sf)$, on effectue la modification suivante : $f_*^- = -sf$. On considère alors que f_* est associée à un mode de corps rigide. La modification de cette fréquence permet a priori de comptabiliser tous les modes de corps rigide. On n'effectue pas plus de ns modifications de la valeur f_* .Dans le cas du flambement linéaire, la transposition est immédiate en remplaçant f_* (fréquence de vibration) par λ_* (charge critique), $(2\pi f_*)^2$ par λ_* et sf par $(2\pi sf)^2$.

Remarque :

Lors des premiers passages, il est fortement conseillé de ne pas modifier ces paramètres qui concernent plutôt les arcanes de l'algorithme et qui sont initialisés empiriquement à des valeurs standards.

3.9.8 Opérande STOP_BANDE_VIDE

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

'OUI' arrête le calcul si aucune fréquence propre n'est détectée dans la bande stipulée par l'utilisateur : une exception (nommée `BandeFrequenceVide`) est émise. Elle peut être traitée pour continuer le déroulement de l'étude.

'NON' n'arrête pas le calcul (émission seulement d'une ALARME) si aucune fréquence propre n'est détectée dans la bande stipulée par l'utilisateur.

3.10 Mot clé VERI_MODE

◇ VERI_MODE = _F(...

Mot clé facteur pour la définition des paramètres de la vérification des modes propres ([§2.9] [R5.01.01]).

3.10.1 Opérande STOP_ERREUR

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

Permet d'indiquer à l'opérateur s'il doit s'arrêter ('OUI') ou continuer ('NON') dans le cas où l'un des critères SEUIL ou STURM n'est pas vérifié.
Par défaut le concept de sortie n'est pas produit.

3.10.2 Opérande SEUIL

◇ SEUIL = r (1.10⁻⁶) [DEFAULT]

Seuil de tolérance pour la norme d'erreur relative du mode au dessus duquel le mode est considéré comme faux.

La norme d'erreur relative du mode est :

$$\frac{\|(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{B})\mathbf{x}\|_2}{\|\mathbf{Ax}\|_2} \text{ pour } \lambda \neq 0 \text{ pour le problème généralisé et}$$

$$\frac{\|(\lambda^2 \mathbf{B} + \lambda \mathbf{C} - \mathbf{A})\mathbf{x}\|_2}{\|\mathbf{Ax}\|_2} \text{ pour le problème quadratique}$$

3.10.3 Opérande STURM

◇ STURM = / 'OUI' [DEFAULT]
/ 'NON'

Vérification dite de STURM ('OUI') permettant de s'assurer que l'algorithme utilisé dans l'opérateur a déterminé le nombre exact de fréquences propres dans l'intervalle de recherche ([§2.5] [§2.6] [R5.01.01]).

3.10.4 Opérande PREC_SHIFT

◇ PREC_SHIFT = prs (0.05) [DEFAULT]

Ce paramètre (qui est un pourcentage) permet de définir un intervalle contenant les fréquences propres calculées, pour lequel la vérification de Sturm sera effectuée([§2.6] [R5.01.01]).

3.11 Opérande INFO

◇ INFO = / 1 [DEFAULT]

/ 2

Indique le niveau d'impression dans le fichier MESSAGE.

- 1 : Impression sur le fichier 'MESSAGE' des fréquences propres, de leur position modale, de l'amortissement réduit, de la norme d'erreur a posteriori et de certains paramètres utiles pour suivre le déroulement du calcul (Cf. [§5.2])
- 2 : Impression plutôt réservée aux développeurs.

3.12 Opérande TITRE

◇ TITRE = ti

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