Conseils de mise en œuvre des calculs en Interaction Fluide-Structure

Résumé

Ce document présente une vue globale des différentes approches disponibles dans *Code_Aster* pour modéliser les effets de l'interaction fluide-structure dans les analyses vibratoires des structures. Il récapitule également nombre de conseils pratiques et de précautions à prendre lors de la réalisation des calculs en Interaction Fluide-Structure.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Table des Matières

1 Les efforts fluides agissant sur une structure vibrante....3
2 Modélisation des forces fluide-élastiques....3
2.1 L'approche « potentielle » pour le calcul de la base modale d'un système couplé....3
2.2 L'approche « configuration prédéfinie » pour le calcul de la base modale d'un système couplé....4
2.2.1 Cas spécial d'un faisceau de tubes sous écoulement transverse....4
2.2.2 Cas des autres configurations....5
2.3 Analyses vibratoires suite à l'obtention de la base modale du système couplé....6
3 Modélisation des forces indépendantes du mouvement de la structure....7
4 Analyse vibratoire d'une structure mouillée : approche spectrale....10
5 Analyse vibratoire d'une structure mouillée : approche temporelle....10
5.1 Conseils pratiques d'utilisation....11

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Les efforts fluides agissant sur une structure vibrante

Il existe deux familles des forces fluides qui peuvent agir sur une structure vibrante dans un milieu fluide :

1. Les **forces fluide-élastiques** : ce sont des forces qui dépendent du mouvement de la structure ; de son déplacement, sa vitesse, et son accélération. Par ce fait, il est convenable de prendre en compte ces effets de couplage fluide-élastique par l'ajout des coefficients aux matrices structurelles de raideur, de masse et d'amortissement.
2. Les **forces indépendantes du mouvement** de la structure. Ce sont les forces qui agissent dans les cas des écoulements turbulents ou diphasiques.

Dans ce document on présente les différents opérateurs de *Code_Aster* qui permettent de modéliser chacune des deux types des forces fluides dans le cadre des analyses vibratoires des structures.

2 Modélisation des forces fluide-élastiques

Dans *Code_Aster*, il existe deux méthodes différentes pour modéliser les forces fluide-élastiques qui représentent les efforts de couplage fluide-structure. La différence entre les deux méthodes est par rapport à la nature et la complexité des phénomènes physiques que l'utilisateur souhaite considérer et, en conséquence, les hypothèses prises lors du calcul des efforts du couplage.

La **première méthode** consiste à calculer des matrices ajoutées représentant le couplage fluide-structure avec une **approche potentielle.** On fait l'hypothèse que la **structure** ne subit que des **petites déformations** et que le **fluide** qui l'entoure est **parfait** ; l'effet du cisaillement dans le fluide est alors considéré négligeable. Pour le calcul de la masse ajoutée, le fluide est considéré instationnaire. Quant à la rigidité et à l'amortissement ajoutés, ceux-ci ne sont calculable qu'en présence d'un écoulement. Dans ce cas, on fait l'hypothèse que l'**écoulement** est **potentiel** ; on néglige alors tout effet lié à la physique des rotationnels de l'écoulement qui peuvent être importants dans des configurations avec décollement ou à des vitesses turbulentes.

La **deuxième méthode** pour modéliser les efforts de couplage consiste à déterminer la matrice de transfert fluide-élastique, particulière pour une **configuration prédéfinie ;** une « configuration » étant l'ensemble : la **structure** et sa géométrie d'un coté et l'**écoulement** et ses propriétés de l'autre. Les configurations qui peuvent être modélisées avec cette méthode sont :

1. Faisceau de tubes sous écoulement transverse
2. Tige sous écoulement à travers d'un confinement annulaire (Grappe de commande)
3. Faisceau de tubes sous écoulement axial
4. Écoulement entre deux coques coaxiales

En dépit de ses hypothèses parfois contraignantes, la méthode potentielle reste malgré tout la plus générique du point de vue de son applicabilité indépendante de la configuration de l'étude. On conseille à l'utilisateur de n'employer la deuxième méthode que dans le cas où son cas d'étude correspond à une des quatre configurations disponibles actuellement.

2.1 L'approche « potentielle » pour le calcul de la base modale d'un système couplé

Dans cette approche, la méthode de calcul consiste à déterminer, dans un premier temps, des matrices ajoutées de masse, de raideur, et d'amortissement fluide à l'aide de l'opérateur CALC_MATR_AJOU ou la macro-commande MACRO_MATR_AJOU. Ces deux opérateurs donnent comme résultat des matrices ajoutées, projetées sur la base modale de la structure dans le vide.

Pour déterminer la base modale de la structure « mouillée », il suffit de combiner les matrices structurelles avec les matrices ajoutées généralisées à l'aide de l'opérateur COMB_MATR_ASSE.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Ensuite il faudra refaire le calcul de modes propres par CALC_MODES. Les modes du système couplé doivent enfin être restitués sur la base physique de la structure avec l'aide de l'opérateur REST_GENE_PHYS. Les étapes du calcul sont détaillées dans le schéma suivant :

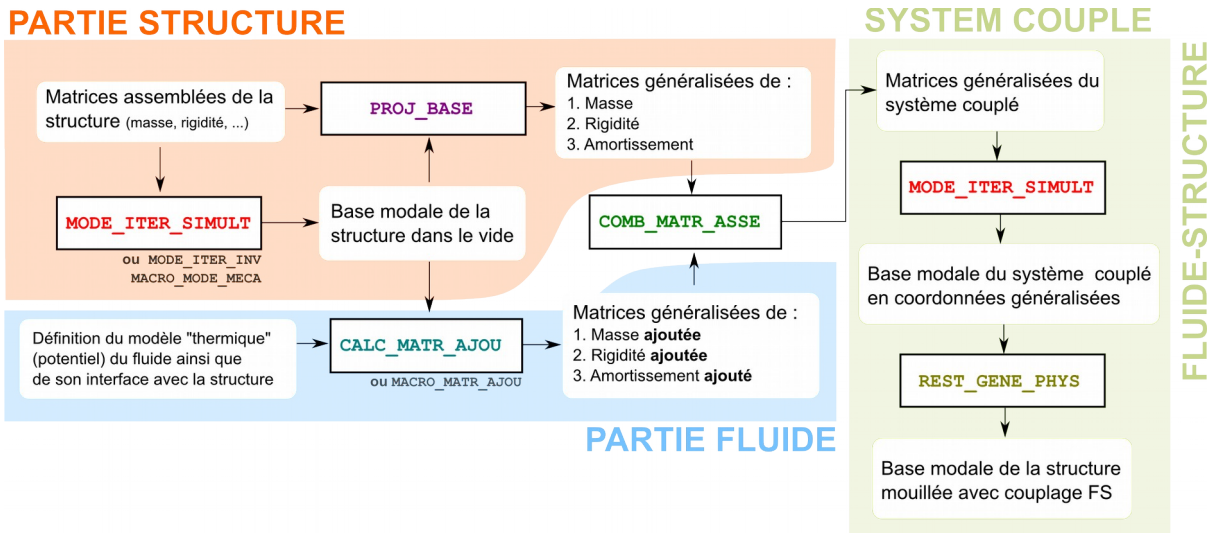


Figure 2.1-a: Schéma de calcul de la base modale d'une structure mouillée par l'approche potentielle

2.2 L'approche « configuration prédéfinie » pour le calcul de la base modale d'un système couplé

La méthode de mise en données et de calcul pour cette deuxième approche est différente de celle dans l'approche potentielle. En effet, les phénomènes physiques qui sont modélisés ici sont plus complexes et les résultats dépendent d'un paramètre additionnel, la vitesse de l'écoulement. Le calcul d'une base modale du système couplé est donc établi pour une gamme de vitesses. On obtient donc avec cette approche, non pas une base modale dynamique traditionnelle (mode_meca), mais une base modale fluide-élastique, qu'on appellera melasflu dans *Code_Aster*.

Pour calculer la base fluide-élastique d'un système couplé, l'utilisateur doit d'abord appeler l'opérateur DEFI_FLUI_STRU pour renseigner le type de configuration de son étude ainsi que toutes les caractéristiques qui lui sont associées. Ces caractéristiques diffèrent selon la configuration mais elles concernent généralement la géométrie de la structure, les propriétés du fluide et de son écoulement.

2.2.1 Cas spécial d'un faisceau de tubes sous écoulement transverse

Dans le cas de la configuration d'un faisceau de tubes sous écoulement transverse (FAISCEAU_TRANS), il est possible de calculer par le moyen de l'opérateur FONC_FLUI_STRU, la répartition inertielle du fluide tout au long de la structure. L'utilisateur peut donc utiliser cette information pour enrichir les matrices structurelles avant d'effectuer son premier calcul modal de la structure. En pratique, après l'appel à FONC_FLUI_STRU, l'utilisateur doit créer un matériau *hybride* fluide-structure en utilisant l'option ELAS_FLUI de DEFI_MATERIAU et l'affecter à tous les éléments de la structure sous écoulement transverse (AFFE_MATERIAU).

Les matrices élémentaires de masse et de rigidité peuvent ensuite être calculées avec les options MASS_FLUI_STRU et RIGI_FLUI_STRU de CALC_MATR_ELEM . Après l'assemblage des matrices élémentaires, l'utilisateur pourra calculer la base modale de la structure mouillée, par exemple avec l'opérateur CALC_MODES.

Il est important de noter que cette prise en compte, en amont, de l'effet inertiel du fluide n'est possible que dans le cas d'un faisceau de tubes sous écoulement transverse. Elle permet

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

d'effectuer par la suite la totalité de l'analyse dynamique sur une base de projection qui correspond à la base modale de la structure mouillée.

2.2.2 Cas des autres configurations

Pour les trois autres configurations, la base modale de référence est déterminée à partir des propriétés mécaniques de la structure (matrices de masse et rigidité purement structurelles), sans aucune prise en compte à ce niveau des effets liés à la présence du fluide.

Une fois la configuration de l'étude et la base de projection de référence sont bien définies, l'étude du système couplé peut poursuivre par un appel à l'opérateur CALC_FLUI_STRU. Cet opérateur récupère, en plus de la configuration de l'étude et la base de projection, une liste des vitesses qui représentent la gamme des vitesses d'écoulement sur laquelle l'utilisateur souhaite étudier le comportement dynamique de sa structure.

Dans le concept résultant de CALC_FLUI_STRU, l'utilisateur dispose pour chaque vitesse d'écoulement, d'une base modifiée par la prise en compte de tous les coefficients du couplage fluide-élastique. Les étapes du calcul pour les quatre configurations sont détaillées dans les deux schémas suivants :

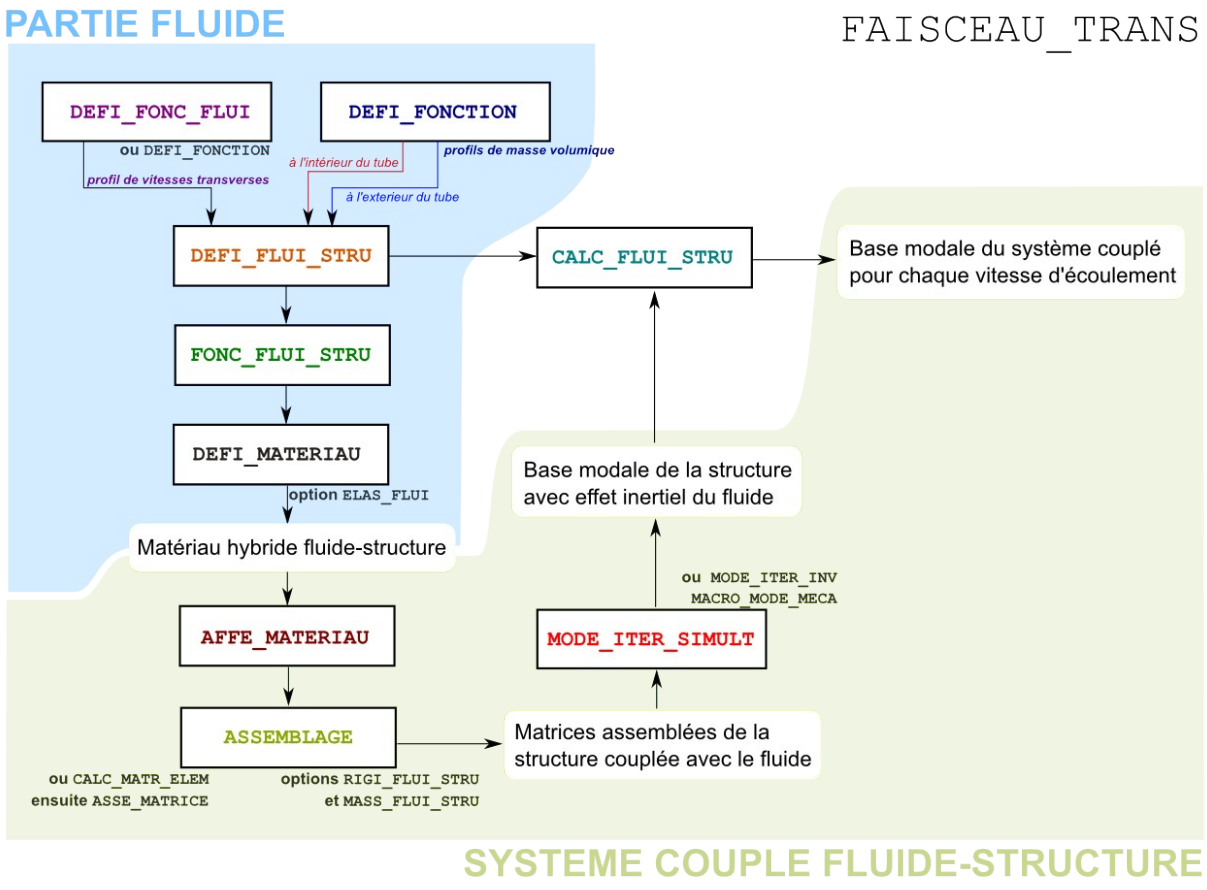


Figure 2.2.2-a: Schéma de calcul de la base modale d'un faisceau de tubes sous écoulement transverse

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

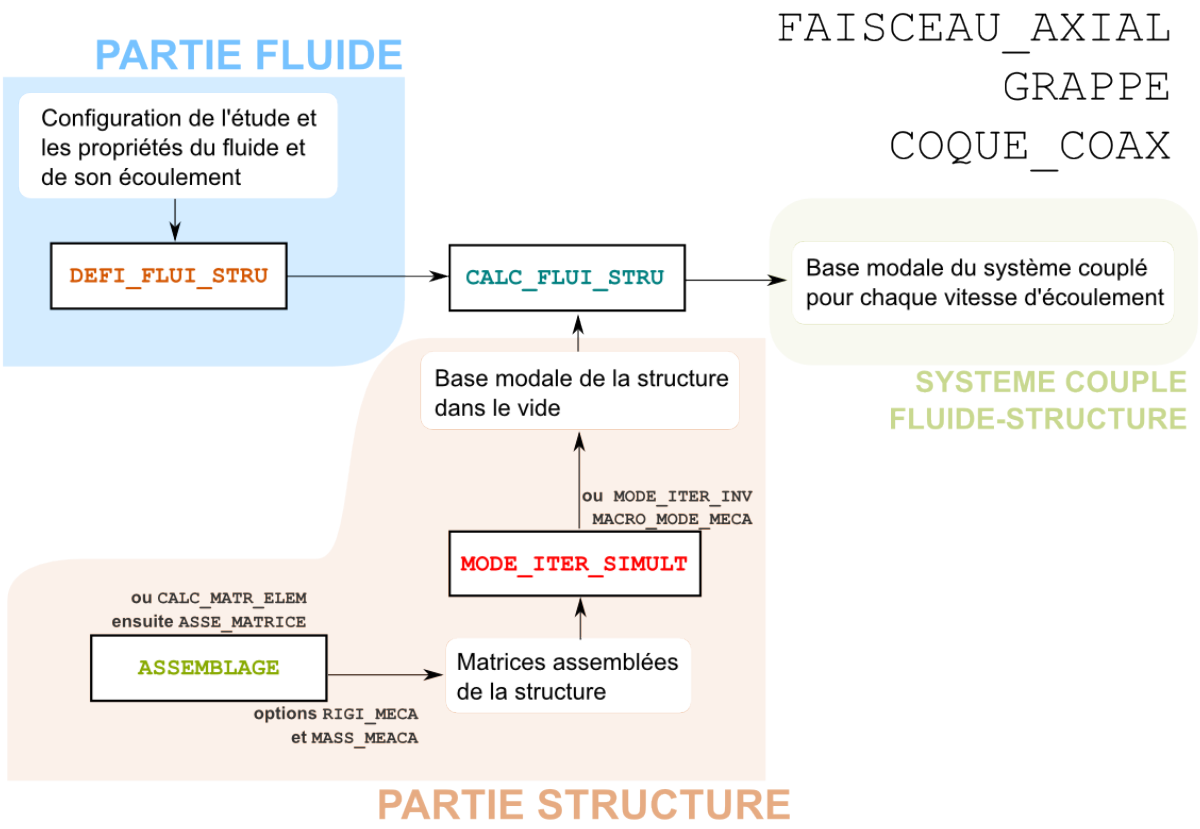


Figure 2.2.2-b: Schéma de calcul de la base modale des structures dans une des 3 configurations : faisceau de tubes sous écoulement axial, grappe de commande, et écoulement entre 2 coques coaxiales.

2.3 Analyses vibratoires suite à l'obtention de la base modale du système couplé

La modélisation des forces fluide-élastiques est pratiquement terminée avec l'obtention d'une base modale dynamique de la structure prenant en compte les effets du couplage. Pour poursuivre son étude, l'utilisateur peut se servir librement de la base modale calculée pour analyser le comportement de son système couplé fluide-structure.

Analyses transitoires

Dans le cas où la modélisation du couplage fluide-élastique a été effectuée selon la deuxième méthode, c'est à dire sur la base d'une configuration prédéfinie dans l'opérateur DEFI_FLUI_STRU, l'utilisateur doit faire appel à l'opérateur MODI_BASE_MODALE afin d'extraire de la base melasflu, une base modale de type mode_meca pour une seule vitesse d'écoulement. La base modale sera utilisable ensuite dans tous les opérateurs de dynamique transitoire.

Dans le cas où des coefficients ajoutés ont été calculé selon la méthode potentielle, l'utilisateur peut se servir directement de la base modale obtenue par la restitution sur base physique de la base des modes généralisés (résultat de l'appel à REST_GENE_PHYS, voir Figure 2.2.2-a).

Il existe actuellement un seul schéma d'intégration temporelle qui accepte des bases modales de type melasflu, c'est la méthode ITMI de l'opérateur DYNA_VIBRA.

Analyses spectrales

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour effectuer une analyse dynamique spectrale du système couplé, l'utilisateur n'est par contre pas obligé d'extraire une base mode_meca à partir de sa base mouillée melasflu. L'opérateur DYNA_SPEC_MODAL qui permet d'effectuer les analyses spectrales est en effet compatible avec les bases modales de type melasflu.

3 Modélisation des forces indépendantes du mouvement de la structure

Dans *Code_Aster*, il est possible de modéliser plusieurs types de forces fluides qui peuvent agir sur une structure sans pour autant dépendre de son mouvement. Physiquement, ces forces sont directement liées à des fluctuations dans la pression le long de la structure, observées dans les régimes turbulents de l'écoulement.

Il est important de noter que le plupart des modèles des forces turbulentes qui sont prédéfinies dans *Code_Aster* ne s'appliquent que pour des configurations bien précises. Il s'agit bien des mêmes configurations qui sont disponibles dans l'opérateur DEFI_FLUI_STRU (voir paragraphe 2.2).

La définition du modèle des forces turbulentes se fait par le moyen de l'opérateur DEFI_SPEC_TURB. Les différents types de spectres de turbulence qui sont disponibles sont présentés dans le tableau suivant. On précise aussi le type de configuration structure-écoulement qui est généralement associée à chaque modèle :

MODELE DU SPECTRE	SIGNIFICATION	CONFIGURATION
SPEC_LONG_CORR_[1-4]	Turbulence de type ***long***ueur de ***corr***élation pour des écoulements transverses	Faisceau de tubes sous écoulement transverse
SPEC_CORR_CONV_[1/2]	Turbulence de type ***conv***ection de couche limite pour des écoulements parallèles	• Plaque sous écoulement parallèle (Corcos) • Faisceau de tubes sous écoulement axial (Au Yang)
SPEC_CORR_CONV_3	Spectre de turbulence défini à partir d'une fonction analytique	Configuration générale
SPEC_FONC_FORME	Spectre de turbulence identifié par sa décomposition sur une famille de **fonc**tions de **forme** *Modèle prédéfini : GRAPPE_1*	Configuration générale *: Grappe de commande*
SPEC_EXCI_POINT	Spectre de turbulence avec **exci**tation de type force ou moment **ponctuels** *Modèle prédéfini : GRAPPE_2*	Configuration générale *: Grappe de commande*

Table 3-1: Détails des modèles de spectres de turbulence disponibles dans l'opérateur DEFI_SPEC_TURB

L'opérateur DEFI_SPEC_TURB produit un concept spectre_sdaster qui contient toutes les informations nécessaires pour la définition du spectre d'excitation turbulente selon le modèle choisi. Par exemple, pour les spectres de type longueur de corrélation (SPEC_LONG_CORR_[1-4]), l'utilisateur doit toujours renseigner le profil de vitesses transverses de l'écoulement, une longueur de corrélation, et les coefficients d'un modèle du spectre de pression. L'utilisateur peut se référer à la documentation de l'opérateur DEFI_SPEC_TURB (U4.44.31) pour plus de détails sur chaque modèle de turbulence et ses paramètres d'entrée.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Il est important pour l'utilisateur de savoir que le « spectre » obtenu en aval de DEFI_SPEC_TURB n'est pas réellement « calculé » à ce stade. On dispose néanmoins dans le concept spectre_sdaster des informations sur le spectre permettant de le projeter sur la base modale de la structure mouillée en utilisant l'opérateur PROJ_SPEC_BASE. L'opérateur PROJ_SPEC_BASE se charge de calculer les intégrales d'acceptance correspondant au spectre et à la base modale de la structure. Il produit une matrice d'inter-spectres d'excitations généralisées.

En complément du modèle de spectre de turbulence (spectre_sdaster) et la base modale de projection, l'utilisateur doit renseigner dans l'opérateur PROJ_SPEC_BASE des informations concernant la discrétisation (fréquentielle) du spectre en utilisant les mot-clés obligatoires FREQ_INIT, FREQ_FIN et NB_POIN. Si la base modale de projection est de type melas_flu, il est oblgatoire à ce stade de préciser la vitesse d'écoulement fluide. Cela permet d'extraire en interne de l'opérateur PROJ_SPEC_BASE, la base de projection qui correspond à la vitesse demandée. L'utilisateur a également l'option de ne calculer que les auto-spectres d'excitations généralisées, c'est à dire seulement les termes diagonaux de la matrice d'inter-spectres généralisée (OPTION='DIAG'). Enfin, il est aussi possible d'effectuer la projection de l'excitation turbulente sur une partie du maillage.

Le concept interspectre produit par l'opérateur PROJ_SPEC_BASE est utilisable ensuite dans tous les opérateurs de *Code_Aster* pour prendre en compte l'effet de la turbulence dans un calcul vibratoire de la structure. L'utilisateur peut choisir une des deux approches équivalentes pour analyser le niveau vibratoire de sa structure mouillée sous excitation turbulente : L'approche spectrale et l'approche temporelle. Nous précisons dans la suite les précautions à suivre dans la mise en œuvre de chacune des deux approches.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

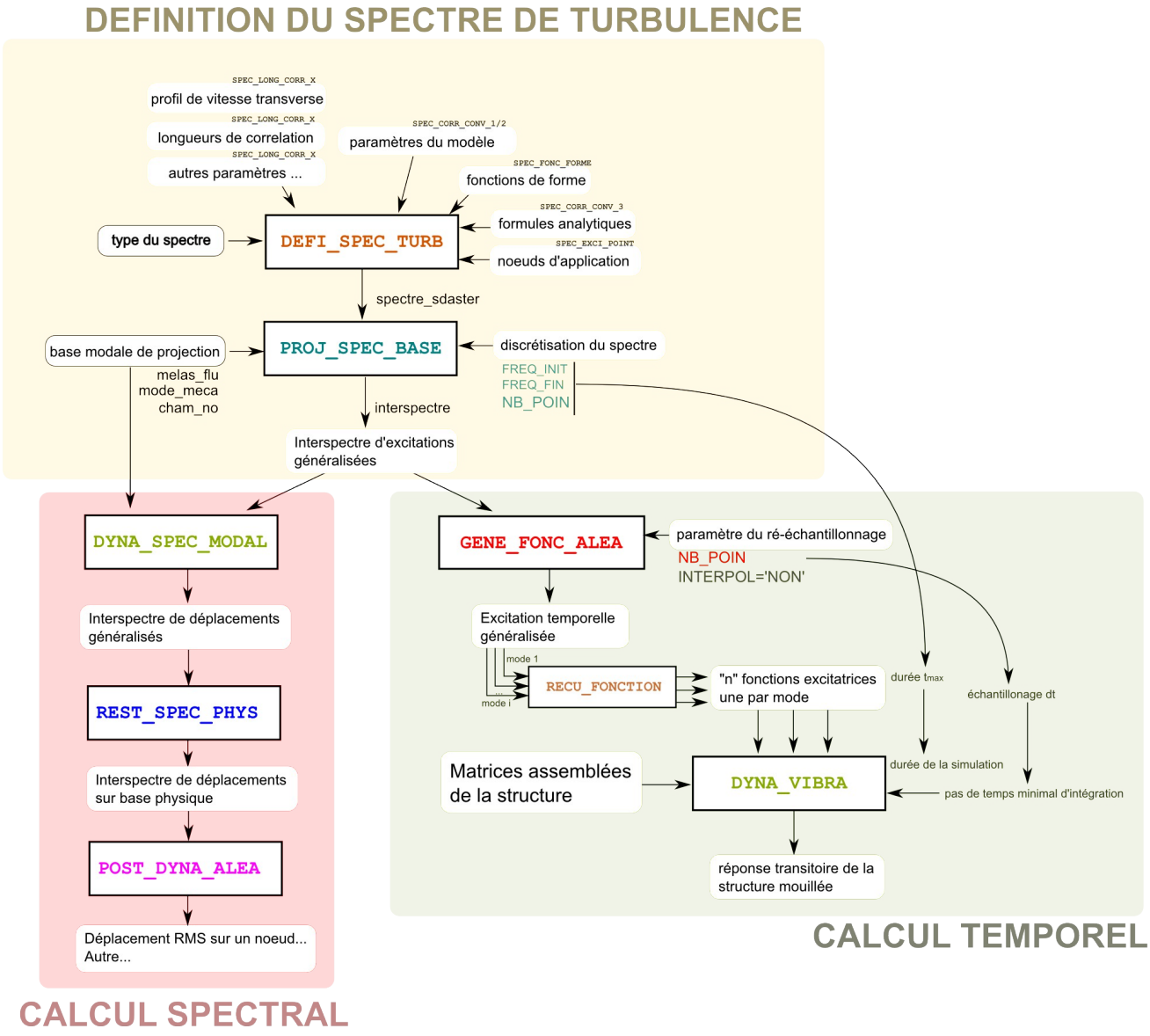


Figure 3-a: Schéma du calcul de la dynamique vibratoire d'une structure mouillée avec prise en compte des forces de turbulence avec les deux approches : spectrale et temporelle

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Analyse vibratoire d'une structure mouillée : approche spectrale

À partir de la base modale de la structure mouillée et l'inter-spectre d'excitation modale calculé dans PROJ_SPEC_BASE, l'utilisateur peut directement procéder au calcul d'un inter-spectre de déplacements généralisés par le moyen de l'opérateur DYNA_SPEC_MODAL. Ici l'utilisateur a également l'obligation de renseigner la vitesse d'écoulement si la base modale est de type melas_flu, et peut choisir de calculer toute la matrice inter-spectrale des déplacements généralisés ou bien uniquement les les termes diagonaux (les auto-spectres).

Pour restituer ses résultats généralisés sur base physique, l'utilisateur doit ensuite faire appel à l'opérateur REST_SPEC_PHYS. Il pourra alors calculer par exemple un inter-spectre de déplacement sur un ou plusieurs nœuds, pour les composants d'intérêt (DX , DY , DRX , etc.). Si le but est de calculer les valeurs RMS, les inter-spectres résultants sont à post-traiter par l'opérateur POST_DYNA_ALEA.

5 Analyse vibratoire d'une structure mouillée : approche temporelle

Dans certains cas, il est intéressant d'étudier le comportement vibratoire d'une structure sous écoulement par une analyse transitoire. L'idée est de générer, à partir de la matrice inter-spectrale d'excitation généralisée (obtenu par PROJ_SPEC_PHYS), une excitation temporelle qui dispose de la même empreinte fréquentielle que le spectre d'origine. Ceci est faisable par le moyen de l'opérateur GENE_FONC_ALEA, qui permet de générer des fonctions excitatrices temporelles à partir d'une matrice inter-spectrale (concept interspectre).

Trois points de très grande importance sont à prendre en compte lors du passage spectrale-temporel. Il agit des relations qui lient :

1. Les échantillonnages fréquentiels de l'opérateur PROJ_SPEC_BASE et de GENE_FONC_ALEA.
2. L'échantillonnage fréquentiel à la durée totale de l'excitation temporelle.
3. L'échantillonnage temporelle de l'excitation à la fréquence de coupure (maximale) du spectre.

L'utilisateur intéressé à faire un calcul transitoire devrait soigneusement choisir la discrétisation fréquentielle de son spectre de turbulence lors de l'appel à PROJ_SPEC_BASE (mot-clés FREQ_INIT, FREQ_FIN et NB_POIN). De plus, il faut que les paramètres d'entrée à l'opérateur GENE_FONC_ALEA soient cohérents avec ceux de PROJ_SPEC_BASE.

Dans PROJ_SPEC_BASE , le spectre est discrétisé à NB_POIN entre FREQ_INIT et FREQ_FIN . Dans l'opérateur GENE_FONC_ALEA , le spectre est ré-échantillonné à un nouveau NB_POIN, différent du celui de PROJ_SPEC_BASE .

Si l'option INTERP='OUI' est utilisée dans GENE_FONC_ALEA , le spectre est interpolé pour des fréquences comprises entre f = 0Hz et f = FREQ_FIN . FREQ_FIN étant déduit automatiquement à partir de la fréquence maximale dans le spectre original. Elle est donc égale à FREQ_FIN de PROJ_SPEC_BASE .

Si l'option INTERP='NON' est utilisée, la fréquence maximale est recalculée. Elle est fonction de la valeur du mot-clé NB_POIN dans GENE_FONC_ALEA .

L'utilisateur doit dans tous les cas renseigner deux valeurs différentes pour le mot-clé NB_POIN dans PROJ_SPEC_BASE et GENE_FONC_ALEA . La valeur minimale du NB_POIN à renseigner dans GENE_FONC_ALEA (GFA) peut être calculée comme la suite :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$NB_{POIN}^{GFA} \geq \frac{(NB_{POIN}^{PSB}-1)\times FREQ_{FIN}^{PSB}}{FREQ_{FIN}^{PSB}-FREQ_{INIT}^{PSB}}+1 \qquad (1)$$

Par exemple, si le spectre de turbulence est discrétisé dans PROJ_SPEC_BASE à 2048 points entre $25,5$ et $45,5\,Hz$, il faudra au moins : $\frac{2047\times 45,5}{45,5-25,5}+1=4657$ points dans GENE_FONC_ALEA pour ne pas perdre des informations sur le spectre d'excitation avant même la génération de la fonction excitatrice temporelle.

5.1 Conseils pratiques d'utilisation

Il est fortement conseillé d'appeler GENE_FONC_ALEA avec l'option INTERP='NON' et de choisir un NB_POIN bien plus grand que la valeur minimale conseillée.

Avec l'option INTERP='NON' , la durée totale de l'excitation temporelle peut être calculée comme l'inverse du pas en fréquence dans le spectre de PROJ_SPEC_BASE , elle est égale à :

$$t_{max}=\frac{1}{\delta f}=\frac{NB_{POIN}^{PSB}-1}{FREQ_{FIN}^{PSB}-FREQ_{INIT}^{PSB}} \qquad (2)$$

Dans l'exemple précédent, la durée de l'excitation est égale à $t_{max}=102,35\,s$.

L'échantillonnage temporel de l'excitation peut être calculé à partir de la fréquence maximal du spectre d'excitation :

$$\delta t=\frac{1}{2\times FREQ_{MAX}^{GFA}}$$

Dans le cas où l'option INTERP='NON' est utilisée dans GENE_FONC_ALEA, la fréquence maximale du spectre utilisé pour la génération de l'excitation temporelle est donnée par la formule :

$$FREQ_{MAX}^{GFA}=\delta f\times NB_{POIN}^{GFA}$$

Il en résulte que :

$$\delta t=\frac{t_{max}}{2\times NB_{POIN}^{GFA}} \qquad (3)$$

En pratique, l'utilisateur qui souhaite effectuer un calcul transitoire dispose généralement d'une idée sur le pas de temps d'intégration temporelle et de la durée totale de son calcul vibratoire. Le choix des différents paramètres se fait dans l'ordre suivant :

1. A partir de la durée totale de la simulation transitoire souhaité, l'utilisateur doit choisir le nombre de points de la discrétisation fréquentielle (NB_POIN) dans PROJ_SPEC_BASE selon l'équation (2).
2. Ensuite, à partir de la durée totale de l'excitation et du pas d'intégration, l'utilisateur peut calculer en utilisant l'équation (3) le nombre de points d'échantillonnage (NB_POIN) à choisir dans l'opérateur GENE_FONC_ALEA. Il faut donc choisir un nombre égale ou supérieur à cette valeur,
3. Enfin, l'utilisateur doit vérifier que la valeur de NB_POIN de GENE_FONC_ALEA vérifie la condition dans l'équation (1),

Pour illustrer l'application en pratique de ses 3 étapes, on considère un cas d'exemple où le spectre de turbulence est défini entre $1,0$ et $384,832\,Hz$ (mot-clés FREQ_INIT et FREQ_FIN de

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

PROJ_SPEC_BASE). De plus, on assume que l'analyse vibratoire transitoire est à faire sur une durée supérieur à $10\,s$ et avec un pas d'intégration minimal de $10^{-4}\,s$.

Selon l'équation (2), $NB_{POIN}{}^{PSB}=t_{max}\left(FREQ_{FIN}{}^{PSB}-FREQ_{INIT}{}^{PSB}\right)+1=3839{,}32$

Une valeur admissible (puissance de 2) est alors $NB_{POIN}{}^{PSB}=4096$, qui donne une durée totale de l'excitation $t_{max}=10{,}6687\,s$

L'échantillonnage fréquentiel (NB_POIN) à choisir dans GENE_FONC_ALEA se calcule ensuite selon l'équation (3) : $NB_{POIN}{}^{GFA}=53343{,}65$

Une valeur admissible est alors $NB_{POIN}{}^{GFA}=65536$ (puissance de 2 et vérifie l'équation (1)). Ce choix dans GENE_FONC_ALEA avec l'option INTERP='NON' conduit à un échantillonnage temporel de l'excitation résultante de : $\delta t=8{,}139\times10^{-5}\,s$. Ceci est compatible avec le pas de temps d'intégration voulu par l'utilisateur ($10^{-4}\,s$).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)