

Manuel d'Utilisation
Fascicule U2.06 : Dynamique
Document : U2.06.07

Interaction sol-structure (ISS) en analyse sismique avec l'interface *Code_Aster* - PROMISS3D

Résumé :

Ce document est une notice de description d'utilisation de l'interface *Code_Aster* - PROMISS3D pour traiter les problèmes d'interaction sol-structure (ISS) en analyse dynamique : vibrations, séisme ... On y présente comme cas d'application le cas standard d'un bâtiment sur radier commun soumis à une excitation sismique traité avec les différentes représentations de la fondation : rigide ou souple avec dans ce dernier cas la prise en compte totale ou réduite des modes de déformation du radier.

1 Introduction

Le traitement en analyse sismique du problème de la tenue de bâtiments posés sur fondation souple nécessite la prise en compte de l'interaction entre le sol et la structure. Or, les outils traditionnels pour traiter cette interaction (PARASOL et CLASSI) n'autorisent que des fondations rigides, ou bien même ne prennent en compte que des sols exclusivement homogènes et des radiers de forme non quelconque (cas de PARASOL). C'est pourquoi le code PROMISS3D, développé à l'Ecole Centrale de Paris, a été chaîné par une procédure implantée dans le *Code_Aster* pour permettre de modéliser à la fois des fondations souples, des sols hétérogènes - avec une extension particulière aux sols stratifiés - et des radiers de forme quelconque, et ainsi permettre les calculs d'interaction dynamique avec une ou plusieurs structures quelconques.

D'une part, la modélisation de la structure du bâtiment ainsi que les chargements qui lui sont appliqués, est réalisée avec le *Code_Aster*, et d'autre part, il faut procéder à l'analyse des contraintes dynamiques obtenues à partir des caractéristiques des éléments de la structure modélisée à l'aide de ce code. Il est donc alors nécessaire de constituer une interface entre PROMISS3D et le *Code_Aster* pour enchaîner les deux opérations précédentes avec le calcul de l'évolution dynamique linéaire de l'ensemble sol-bâtiments effectué par PROMISS3D.

Ce document a donc pour propos de décrire cette interface constituée par des modules de calcul développés autour de PROMISS3D et par de nouvelles commandes spécifiques du *Code_Aster*. On y fait au préalable une description simplifiée du logiciel PROMISS3D, la description complète et détaillée de son principe étant faite dans le manuel utilisateur de PROMISS3D - MISS2D [bib1]. On y présente le cas d'application standard d'un îlot nucléaire soumis à une excitation sismique traité avec différents cas de fondation : rigide ou bien souple avec ou sans réduction de modes de déformation du radier.

2 Description et principe du logiciel PROMISS3D

Le logiciel PROMISS3D permet de traiter les problèmes de propagation d'onde dans des domaines élastiques ou fluides.

Il utilise l'hypothèse de linéarité géométrique et de comportement : soit l'équation de Navier (conservation de la quantité de mouvement) avec la loi de Hooke dans les milieux élastiques et l'équation des ondes dans les milieux fluides.

Cette hypothèse permet d'appliquer une transformation de Fourier par rapport à la variable temporelle pour l'ensemble des champs à calculer et donc, d'opérer la résolution dans le domaine des fréquences. Le retour dans le domaine temporel s'effectue en post-traitement par la transformation de Fourier inverse.

Enfin, le logiciel PROMISS3D repose sur une méthode de sous-structuration : le domaine d'étude est décomposé en sous-domaines couplés entre eux par des interfaces. On y applique une méthode de résolution multi-domaines et seules les interfaces entre domaines nécessitent d'être maillées par des éléments finis de frontière.

La résolution s'effectue alors sur les frontières des sous-domaines et est fondée sur la connaissance de solutions élémentaires, les fonctions de Green, champs générés dans un domaine infini par une sollicitation ponctuelle. On peut ainsi traiter le cas des domaines non bornés, en évitant toute réflexion parasite sur des frontières fictives tronquant le domaine d'étude. De plus, une extension originale et économique a été apportée à la méthode par l'introduction du traitement de domaines stratifiés prenant implicitement en compte différentes couches homogènes d'un domaine sans avoir recours à un maillage de leurs interfaces.

3 Principe de l'interface Code_Aster - PROMISS3D

3.1 Cas du domaine extérieur dans PROMISS3D

Dans le cas d'un ou plusieurs bâtiments soumis à une excitation sismique dont on veut étudier l'interaction sol-structure (ISS), on sépare par une interface Σ le domaine de la « structure » comprenant les bâtiments (mais aussi éventuellement des parties de sol non stratifié comme des remblais) du domaine « sol » (soit stratifié, soit homogène ou comportant même des parties fluides (ex. : retenue de barrage)) modélisé directement par PROMISS3D [Figure 3.1-a].

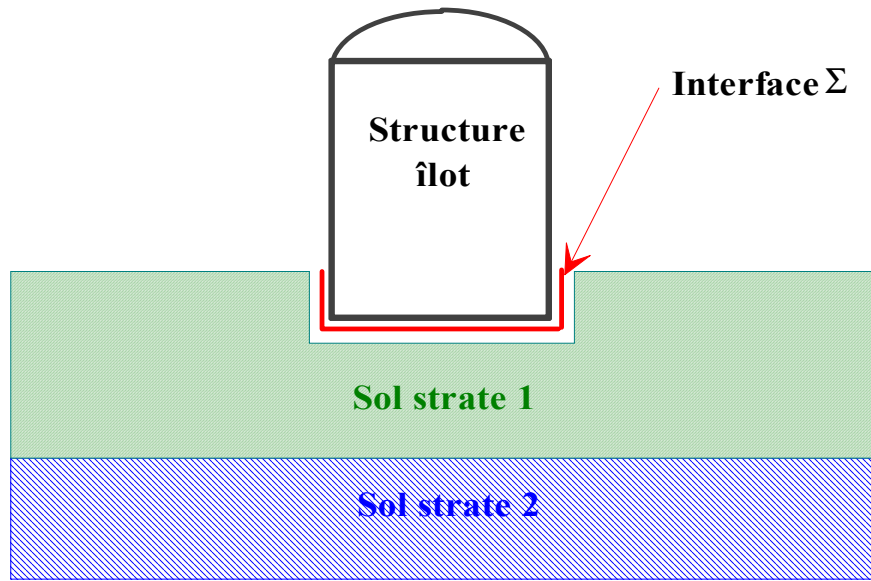


Figure 3.1-a : Modèle d'interface sol - structure

La structure modélisée par le *Code_Aster* est considérée comme un domaine extérieur pour PROMISS3D. Dans ce cas, on décompose un déplacement dans ce domaine sur des modes qui, réduits à l'interface, peuvent être nuls c'est à dire les modes propres dynamiques de la structure sur base fixe Φ , ou non nuls, c'est-à-dire les modes statiques Ψ :

$$\mathbf{u} = \sum \mathbf{a}_i \phi_i + \sum \mathbf{b}_j \psi_j$$

Les coefficients \mathbf{a}_i et \mathbf{b}_j sont respectivement les facteurs de participation des modes dynamiques et statiques. \mathbf{M} et \mathbf{K} sont respectivement les matrices assemblées de masse et de rigidité. Alors, l'écriture de l'équilibre du domaine « structure » au sens des travaux virtuels fournit le système suivant :

$$\left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{dd} & \mathbf{K}_{ds} \\ \mathbf{K}_{ds} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{dd} & \mathbf{M}_{ds} \\ \mathbf{M}_{ds} & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_d \\ \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_\Sigma \end{Bmatrix}$$

Les matrices \mathbf{K}_{dd} et \mathbf{K}_{ss} sont les rigidités assemblées projetées respectivement sur les modes dynamiques Φ et statiques Ψ : $\Phi^T \mathbf{K} \Phi$ et $\Psi^T \mathbf{K} \Psi$.

Les matrices \mathbf{M}_{dd} , \mathbf{M}_{ss} sont les masses assemblées projetées respectivement sur les modes dynamiques Φ et statiques Ψ : $\Phi^T \mathbf{M} \Phi$ et $\Psi^T \mathbf{M} \Psi$.

\mathbf{K}_{ds} et \mathbf{M}_{ds} sont les termes de liaison ou produits croisés : $\Phi^T \mathbf{K} \Psi$ et $\Phi^T \mathbf{M} \Psi$.

\mathbf{f}_d et \mathbf{f}_s sont les projections respectives sur les modes dynamiques Φ et statiques Ψ du vecteur forces appliquées \mathbf{F} sur le domaine « structure » : $\Phi^T \mathbf{F}$ et $\Psi^T \mathbf{F}$.

\mathbf{f}_Σ représente l'action au signe près du domaine « structure » sur l'interface et peut donc s'exprimer à partir du système précédent, en éliminant le facteur \mathbf{a} , par : $\mathbf{f}_\Sigma = \mathbf{f}_{eq} + \mathbf{K}^* \mathbf{b}$

avec \mathbf{f}_{eq} le vecteur de forces équivalentes et \mathbf{K}^* la matrice d'impédance du domaine donnés par :

$$\mathbf{f}_{eq} = -\mathbf{f}_s + (\mathbf{K}_{ds} - \omega^2 \mathbf{M}_{ds})^T (\mathbf{K}_{dd} - \omega^2 \mathbf{M}_{dd})^{-1} \mathbf{f}_d$$

$$\mathbf{K}^* = (\mathbf{K}_{ss} - \omega^2 \mathbf{M}_{ss}) - (\mathbf{K}_{ds} - \omega^2 \mathbf{M}_{ds})^T (\mathbf{K}_{dd} - \omega^2 \mathbf{M}_{dd})^{-1} (\mathbf{K}_{ds} - \omega^2 \mathbf{M}_{ds})$$

On démontre simplement que l'on peut se ramener à la résolution de 2 problèmes locaux pour obtenir \mathbf{f}_{eq} et \mathbf{K}^* . En effet \mathbf{f}_{eq} , solution du 1^{er} problème local, est l'effort appliqué sur l'interface bloquée quand on applique les forces sur le domaine « structure ». Et quand, dans le 2nd problème local, on impose des déplacements de modes statiques unitaires \mathbf{b} sur l'interface sans forces appliquées sur le domaine « structure », on obtient $\mathbf{K}^* \mathbf{b}$ comme effort appliqué sur l'interface.

La résolution s'effectue sur le(s) interface(s) qui doit (ou doivent) être maillée(s) avec des éléments surfaciques orientés vers l'intérieur du domaine « sol » et sur cette (ou ces) interface(s) il doit y avoir entre 6 et 10 nœuds par longueur d'onde. Dans le domaine du séisme on s'intéresse à une plage de fréquence allant de 0.1 Hz à 30 Hz.

3.2 Contenu de l'interface

Le chaînage Code_Aster - PROMISS3D nécessite le transfert des informations suivantes.

Dans le sens Code_Aster vers PROMISS3D, on transfère successivement :

- les informations concernant le maillage de l'interface sol-structure (nœuds et éléments surfaciques) ainsi que les modes statiques d'interface et les modes dynamiques de la structure réduits aux nœuds de cette interface et ordonnés selon sa numérotation locale,
- les informations sur la base modale des modes statiques et dynamiques indépendantes de la numérotation locale : les masses et rigidités modales, les facteurs de participation modaux et autres termes de couplage entre les modes dynamiques Φ et les modes statiques Ψ et, pour chaque charge interne à la structure, les projections du vecteur assemblé correspondant, sur les modes statiques et dynamiques ainsi que la fonction multiplicative du temps associée.

Dans le sens PROMISS3D vers Code_Aster, on récupère :

- Des évolutions de résultats de déplacements, vitesses et accélérations généralisés (type "TRAN_GENE") $\alpha(t)$, $\alpha'(t)$, $\alpha''(t)$ d'une part, et $\beta(t)$, $\beta'(t)$, $\beta''(t)$ d'autre part, projetés respectivement à partir des modes dynamiques Φ et des modes statiques Ψ . On pourra ensuite projeter, puis combiner ces résultats sur la base physique : $\mathbf{U}(t) = \Phi \cdot \alpha(t) + \Psi \cdot \beta(t)$.
Dans le cas d'un calcul harmonique on récupère des évolutions complexes par fréquence $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$ (de type "HARM_GENE") avant de les projeter pour en produire une évolution harmonique sur la base physique : $\mathbf{U}(\omega) = \Phi \cdot \alpha(\omega) + \Psi \cdot \beta(\omega)$. $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$ sont toujours complexes à cause de la forme complexe de l'impédance de sol : \mathbf{K} .

3.3 Procédure d'enchaînement des programmes

Une procédure automatique a été constituée afin d'encapsuler les programmes nécessaires au chaînage Code_Aster - PROMISS3D.

L'utilisateur doit tout d'abord constituer les données du Code_Aster pour le pré-traitement ainsi que celles pour décrire les stratifications du sol dans le module DOS2M de PROMISS3D afin de calculer les fonctions de Green.

Un premier programme, **gtaster**, à partir du fichier résultat du Code_Aster, génère les données de PROMISS3D comprenant : le maillage de l'interface (suffixe *.mail*), les données de calcul (*.in*), les impédances de la structure (*.ext*), les chargements sur la structure (*.cext*), les données de post-traitement (*.post*).

Un second programme, **ptaster**, récupère les mouvements de l'interface calculés par PROMISS3D en déplacements, vitesses et accélérations généralisés et les transmet au Code_Aster pour les post-traiter.

Il est possible dans une même soumission de lancer successivement les programmes **gtaster**, PROMISS3D, **ptaster** sur la machine centrale de traitement par des appels successifs à EXEC_LOGICIEL contenus dans une macro-commande du Code_Aster appelée MACRO_MISS_3D [U7.03.11].

4 Utilisation de l'interface Code_Aster - PROMISS3D

L'interface Code_Aster-PROMISS3D suit le schéma suivant [Figure 4-a] :

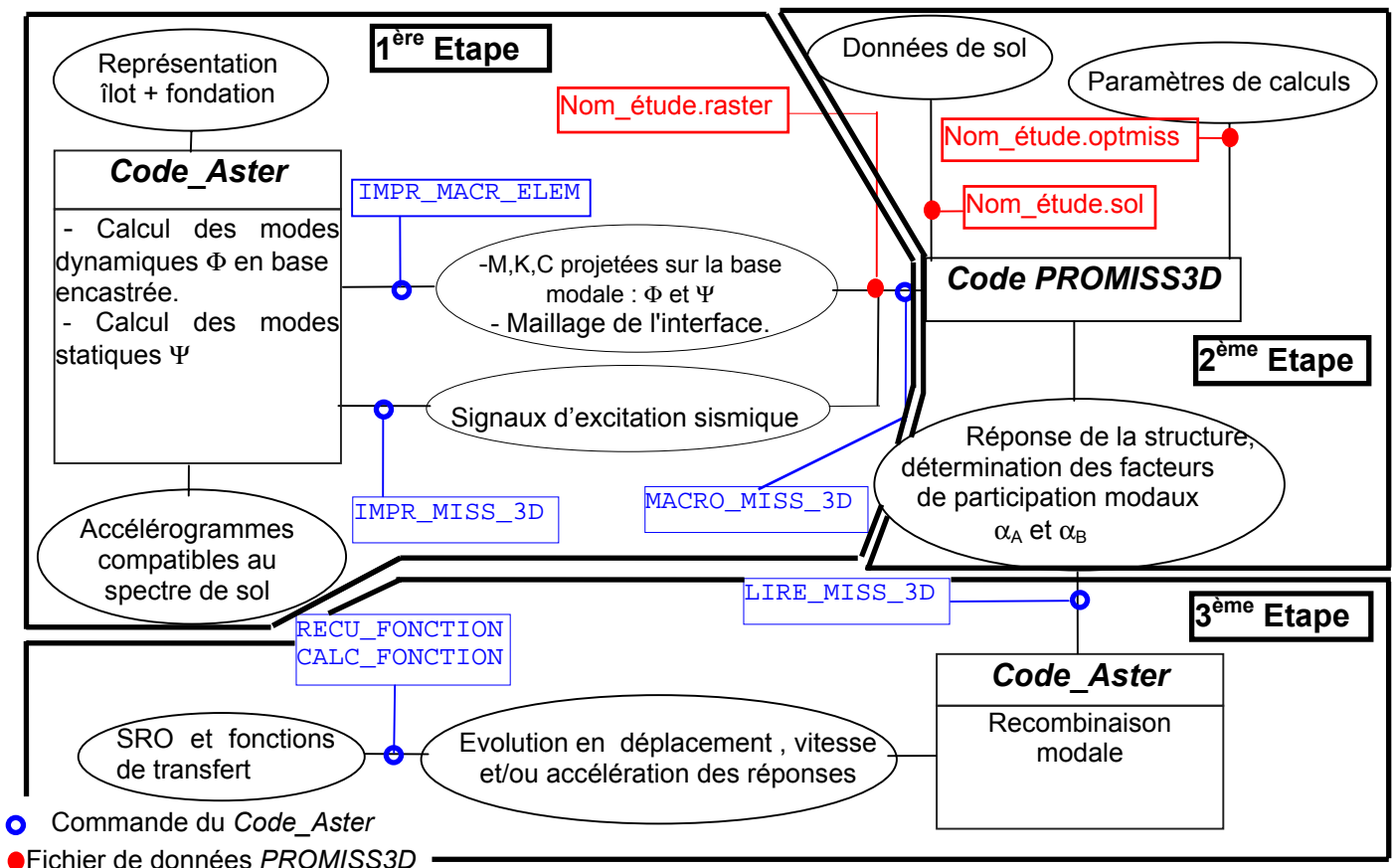


Figure 4-a : Les principales étapes des calculs d'ISS

4.1 Commandes du Code_Aster pour le pré-traitement

Avant d'utiliser les commandes du Code_Aster spécifiques au couplage, il est nécessaire de passer par les étapes suivantes de modélisation de la structure :

- calcul des modes propres par la commande `MODE_ITER_SIMULT` [U4.52.03],
 - définition de l'interface dynamique, produisant le type (CRAIGB (préconisé) ou MC-NEAL) et le maillage de l'interface sol-structure, par la commande `DEFI_INTERF_DYNA` [U4.64.01],
 - définition d'une base modale complète par la commande `DEFI_BASE_MODAL` [U4.64.02] : elle calcule les modes statiques de l'interface dynamique précédemment définie et complète la base des modes propres si la base est de type `CLASSIQUE`. Il est également possible de calculer des modes statiques quelconques directement sans interface dynamique (dans ce cas on n'utilise pas la commande `DEFI_INTERF_DYNA`) par la commande `MODE_STATIQUE` [U4.52.14] et de définir ensuite une base modale complète de type `RITZ` par la commande `DEFI_BASE_MODAL`. L'intérêt des bases modales de `RITZ` est de pouvoir assembler des modes calculés avec des conditions aux limites différentes. Par exemple, les modes dynamiques calculés en base encastree avec tous les ddls de l'interface bloqués et les modes statiques d'interface calculés de diverses façons :
 - soit avec une condition de liaison solide qui confère à l'interface un mouvement de corps rigide,
 - soit avec des modes d'interface d'allure quelconque calculés comme des modes propres (via la commande `MODE_ITER_SIMULT`) de la structure sur tapis de ressorts de sol ;
 - assemblage du macro-élément dynamique par la commande `MACR_ELEM_DYNA` [U4.65.01], à partir de la base modale précédemment définie.
- Les données à transférer du Code_Aster vers PROMISS3D sont obtenues par l'utilisation de 2 commandes spécifiques :
- la première commande `IMPR_MACR_ELEM` [U7.04.33] permet de produire le maillage de l'interface sol-structure et les modes statiques et dynamiques réduits à cette interface. Ces termes servent à établir la contribution de la structure sur l'impédance.
 - évolution en temps ou en fréquence dont l'utilisateur fournira les instants ou les fréquences de restitution.

Si l'évolution est fréquentielle, les fréquences de calcul, définies dans PROMISS3D, doivent être cohérentes avec celle définies dans `IMPR_MISS_3D` (généralement on utilise la plage de fréquence d'étude entre 0 et 30 Hz lors d'études sismiques).

Si l'évolution est temporelle, la plage de restitution en temps définie dans `IMPR_MISS_3D` doit être comprise dans la durée de l'excitation sismique.

On peut, pour le calcul de cette évolution, définir à la fois des chargements dans la structure par le mot-clé facteur `EXCIT`, comprenant le vecteur assemblé correspondant à chacune de ces charges, et des chargements provenant du sol (signaux d'excitation sismique) par le mot-clé facteur `EXCIT_SOL`, comprenant le type d'excitation et la direction de chacune de ces charges. Dans chacun de ces mots-clés facteurs, on donne également le signal en fréquence ou en temps associé à la charge définie. Les chargements donnés par `EXCIT` ou `EXCIT_SOL` dans un même appel à `IMPR_MISS_3D` sont combinés dans une seule évolution calculée par PROMISS3D. `IMPR_MISS_3D` est donc répétable pour obtenir plusieurs évolutions calculées.

On clôture dans un premier temps le jeu de données du Code_Aster par le mot `FIN` puis on l'exécute. On crée ainsi des concepts résultats (modes et macro-élément dynamique notamment) sur une base de données stockée sur la machine centrale de traitement.

On donne ainsi la main à PROMISS3D afin de calculer par une résolution dans le domaine des fréquences chacune des évolutions précédemment définies. Selon la stratégie de restitution (en temps ou en fréquence) de cette évolution, on appliquera ou pas une transformation de Fourier inverse.

Il est possible de traiter dans une même soumission sans écriture sur une base de données les commandes de pré-traitement, le lancement de PROMISS3D par `MACRO_MISS_3D` [U7.03.11] et les commandes de post-traitement. Mais à l'exception des problèmes de petite taille, il est fortement conseillé, pour des raisons de taille mémoire et de maîtrise du paramètre temps dans les classes de soumission, de continuer à fractionner l'étude en 3 temps et de travailler avec une base de données Aster.

4.2 Commandes du Code_Aster pour le post-traitement

La commande `LIRE_MISS_3D` [U7.02.31] permet de récupérer une évolution de son choix parmi celles calculées par PROMISS3D, le choix se faisant par la donnée d'une unité logique. Il est nécessaire de rappeler le type de l'évolution, transitoire ou harmonique. Dans ce dernier cas, on récupère à la fois la partie réelle et la partie imaginaire données pour chaque fréquence de calcul des déplacements, vitesses et accélérations généralisés. Par la donnée de la base modale complète de projection, via le macro-élément dynamique, on obtient alors l'évolution transitoire ou harmonique sur la base physique de la structure modélisée par le *Code_Aster*.

On peut ensuite procéder au post-traitement classique d'une étude sismique :

- Extraction des évolutions temporelles de champs d'accélération ou déplacement à divers niveaux de sol ou de structure par la commande `RECU_FONCTION` [U4.32.03].
- Calcul des spectres de réponse en ces mêmes niveaux de sol ou de structure par la commande `CALC_FONCTION` [U4.32.04] et l'opérande `SPEC_OSCI`.

4.3 Commandes spécifiques à MISS3D

4.3.1 Les commandes

Il est possible, hors utilisation standard de l'interface *Code_Aster*-PROMISS3D, d'utiliser des outils de calculs spécifiques à MISS3D et de récupérer les résultats exploitables ou non par le *Code_Aster*. Ainsi, en agissant sur les fichiers de pré-traitement PROMISS3D (cf [§3.3] et [Figure 4-a]) liés à l'optimisation des calculs (extension `.optmis`) et/ou aux données de calcul (extension `.in`), on peut bénéficier des options suivantes (cf [§ 5.1.4] pour avoir des exemples d'utilisation):

- Calcul avec pas de fréquence variable. La résolution de l'équation des ondes (cf. [§ 2]) se fait alors dans le domaine des fréquences avec un pas plus ou moins grossier selon les bandes de fréquences. Cela permet de raffiner autour des fréquences intéressantes et d'être moins précis ailleurs [§ 5.1.4.1].
- Définition de points de contrôle. Les points de contrôle permettent de récupérer des informations, notamment sur les champs incidents et les champs diffractés par le(s) interface(s) (cf. [Figure 3-a]), n'importe où dans le sol.
Pour cela on doit écrire un fichier d'instructions MISS3D (son nom et son extension sont totalement libres) qui vont permettre d'extraire vers un fichier de sortie des évolutions de champs incidents ou diffractés pour chaque point de contrôle et dans chaque direction de l'espace [§ 5.1.4.2].
- Dans le cas de fondation enterrée (cf. [§ 5.1.3.2]) des résonances fictives apparaissent dans certaines configurations : sols mous, radier étendu. Elles sont dues à la résonance de la partie de sol excavée et se situent à une fréquence proche de $f_{fictive} = V_p / 4H$ où V_p est la vitesse de l'onde de compression et H la profondeur de l'excavation.
Une option permet de s'en affranchir en utilisant la commande `RFIC` dans le fichier lié à l'optimisation des calculs (extension `.optmis`) [§ 5.1.4.3].
- Calcul simultané des impédances de sol et d'une réponse transitoire et/ou harmonique de la structure.
Pour cela on doit utiliser un fichier d'instructions MISS3D qui vont permettre d'écrire dans un fichier de sortie les valeurs des impédances de sol ou des forces sismiques en fonction de la fréquence pour tous les ddls de l'interface [§ 5.1.4.4].

4.3.2 Les fichiers MISS3D

Deux fichiers de MISS3D, situés dans le répertoire associé à l'étude sur le serveur dédié au *Code_Aster* et au logiciel PROMISS3D, sont intéressants pour vérifier ou contrôler quels types de calculs sont réalisés lors de l'étude et le temps associé à chaque commandes MISS3D.

4.3.2.1 Les fichiers de données principales

Il a nécessairement le suffixe .in (nom_étude.in par exemple) et contient toutes les commandes utilisées par MISS3D lors de l'étude. Il peut faire appel à des fichiers de données auxiliaires. Il se décompose schématiquement en trois parties :

- définition des données,
- étapes de calcul,
- post-traitement,

ces différentes phases pouvant être enchaînées et répétées en respectant la logique du programme. L'exécution peut être menée en plusieurs phases avec des reprises des différentes étapes de calcul

4.3.2.2 Les fichiers de données auxiliaires

L'ensemble des données nécessaires à la définition d'un problème complexe conduit à un fichier de commande de grande taille dans lequel la hiérarchie des informations a tendance à disparaître. De plus, souvent des calculs similaires ont des fichiers de données qui ne diffèrent que de quelques lignes, les parties communes pouvant être consignées dans un même fichier. Afin de permettre de tels découpages, il est possible dans certains menus de débrancher la lecture des données sur un fichier auxiliaire au moyen du mot-clé FICP.

4.3.2.3 Le fichier de sortie

Il a nécessairement le suffixe .out (nom_étude.out par exemple) et donne une image de l'ensemble des commandes lues par le programme, ainsi que les temps CPU passés dans chacune des phases de calcul. Les informations imprimées durant les différentes phases du programme sont détaillées pour chacun des mot-clés.

5 Cas d'application de prise en compte de l'ISS par l'interface Code_Aster - PROMISS3D

Prendre en compte l'ISS cela revient à représenter le sol par un système mécanique équivalent. Deux méthodes sont actuellement utilisées :

- la méthode réglementaire des ressorts de sol pour laquelle les raideurs du système de ressorts de sol sont indépendantes de la fréquence et ajustées sur le premier mode de balancement et le premier mode de pompage du système couplé sol-bâtiment(s),
- la méthode fréquentielle de couplage où l'impédance du sol évolue en fonction de la fréquence.

C'est la méthode fréquentielle de couplage qui est mise en œuvre dans PROMISS3D [bib1] pour modéliser l'ISS. Cependant, cette méthode permet de déterminer les raideurs du système de ressorts de sol de la méthode réglementaire grâce à une option spécifique du chaînage Code_Aster/PROMISS3D (option MISS_IMPE de la commande MACRO_MISS_3D). Dans ce cas, le calcul suit le schéma suivant :

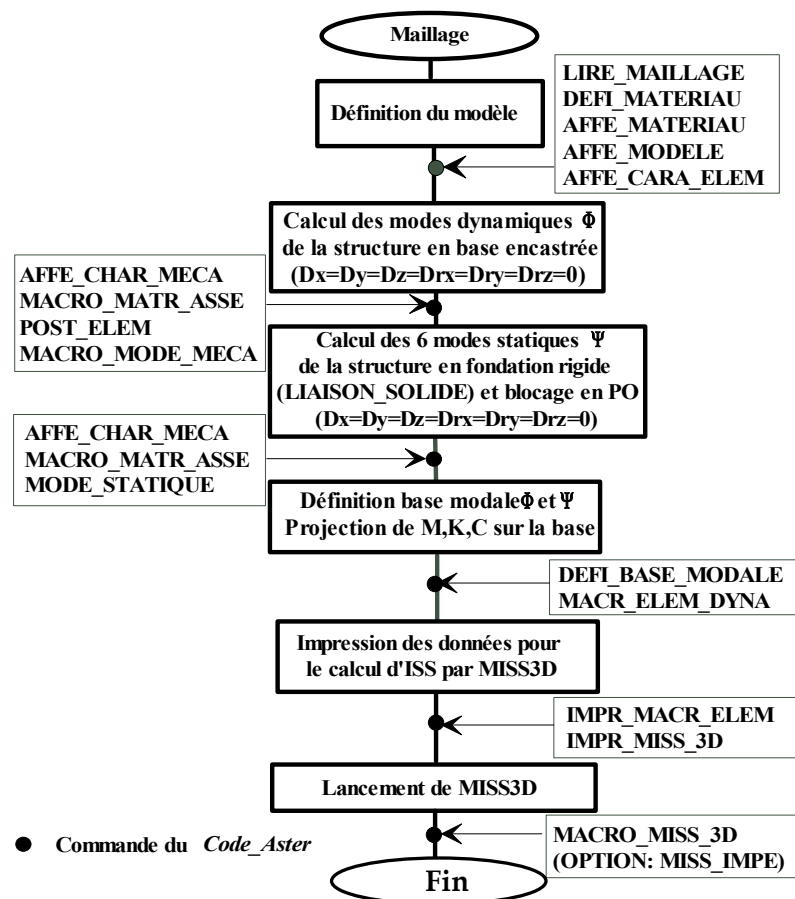


Figure 5-a : Synoptique du calcul des raideurs du ressort de sol équivalent

La méthode d'ajustement des raideurs du système de ressorts de sol sur le premier mode de balancement et le premier mode de pompage du système couplé sol-bâtiment(s) est décrite dans le document [bib3].

Comme cas d'application du chaînage Code_Aster/PROMISS3D, on prend comme exemple une structure complexe [Figure 5-b], [Figure 5-c] reposant sur un radier cruciforme [bib4]. L'intérêt de ce cas est qu'il permet de considérer les différents modes de représentation de l'interface sol structure. Ainsi, la fondation peut être considérée soit rigide, soit souple avec la totalité des modes statiques, soit souple avec quelques modes de fondation choisis selon une méthode de réduction modale [bib2].

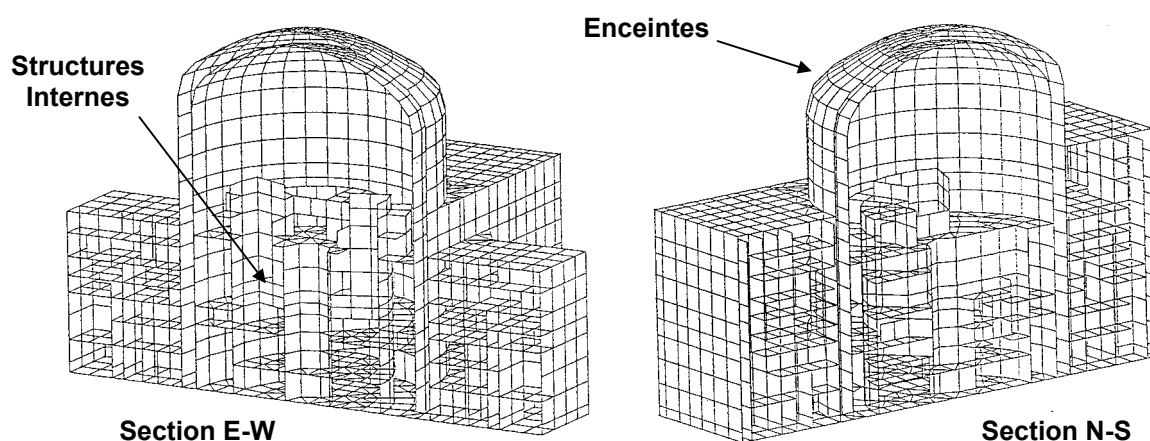


Figure 5-b : Maillage de la structure

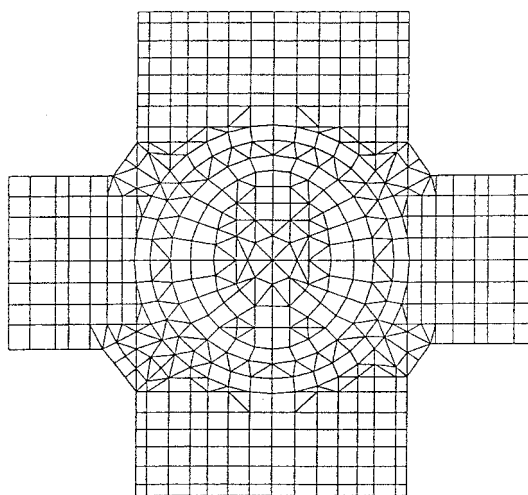


Figure 5-c : Maillage de la fondation de la structure

5.1 Le chaînage Code_Aster - PROMISS3D : Etapes et paramètres

Les calculs sont réalisés en mettant en œuvre le chaînage Code_Aster - PROMISS3D. Les différents paramètres et étapes nécessaires au calcul d'ISS sont décrits ci-dessous :

5.1.1 Les données transmises par le Code_Aster (cf. [Figure 4-a])

Le Code_Aster transmet à PROMISS3D : le maillage de l'interface entre le sol et la structure (face inférieure du radier), la base modale combinant les modes dynamiques Φ de la structure et les modes statiques Ψ ainsi que la projection sur cette base des matrices M, K et C. Cette opération est réalisée via l'opérateur IMPR_MACR_ELEM du Code_Aster.

Le Code_Aster transmet aussi les données relatives à l'excitation sismique : ce sont les accélérogrammes **acc1**, **acc2** et **acc3**. Cela se fait grâce à la commande IMPR_MISS_3D du Code_Aster.

L'ensemble des données transmises via les opérateurs IMPR_MACR_ELEM et IMPR_MISS_3D sont imprimées dans le fichier résultat **nom_étude.raster** de type : `libr` sur l'unité 26 par défaut.

5.1.2 Les données propres à PROMISS3D pour son calcul dans le domaine fréquentiel

PROMISS3D est basé sur l'hypothèse de linéarité tant du point de vue géométrique que du point de vue du comportement des matériaux [bib1]. Cette hypothèse de linéarité permet de résoudre les problèmes dans le domaine fréquentiel. C'est dans le fichier : **nom_étude.optmiss**, qui se trouve dans le répertoire associé à l'étude Aster, que l'on définit les paramètres nécessaires aux calculs dans le domaine des fréquences. On y trouve notamment la plage de fréquence [**Fmin**, **Fmax**] dans laquelle va s'effectuer le calcul et le pas d'échantillonnage **dF**. Le fichier **nom_étude.optmiss** est donné en annexe 1 du document.

Les règles d'ajustement des paramètres sont rappelées dans le document [bib1]. Pour notre part nous avons pris les paramètres suivants pour l'étude d'un îlot nucléaire :

Fmax	La plage de fréquence dépend de la nature du sol. La fréquence maximale retenue est de 20 Hz (sol moyen-mou).
dF = 0.1 Hz	La fréquence d'échantillonnage retenue est identique à celle des accélérogrammes acc1.c2 , acc2.c2 et acc3.c2 utilisés pour l'excitation sismique.
Fmin = 0.1 Hz	Ce paramètre est fonction des deux précédents. Il faut que le rapport $\frac{F_{Max} - F_{min}}{dF}$ soit un entier.
Z0 = -11.60 m	On doit rentrer la cote de la base de la fondation. Pour notre étude la fondation est superficielle. L'axe Oz du modèle doit toujours être vertical et les normales aux plans du maillage de la fondation sont obligatoirement orientées vers l'intérieur du domaine du sol.

5.1.3 Les données relatives au sol

C'est dans le fichier **nom_étude.sol**, qui se trouve dans le répertoire associé à l'étude Aster, qu'on décrit les données relatives au sol. La constitution du sol stratifié y est renseignée ainsi que l'emplacement du foyer de l'excitation sismique et les paramètres d'échantillonnage des fonctions de Green. Le fichier **nom_étude.sol** est donné en Annexe 1 du document.

5.1.3.1 Données de sol

Elles sont données couche par couche. On y décrit les caractéristiques mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson, masse volumique, amortissement réduit) des matériaux constitutifs des couches et leurs épaisseurs.

Rappels :

- La vitesse de propagation des ondes de compression est donnée par :

$$v_p = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

- La vitesse de propagation des ondes de cisaillement est donnée par : $v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$

- Le module de cisaillement G , le module d'élasticité E (Young) et le coefficient de Poisson ν sont reliés par la relation : $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

5.1.3.2 Discrétisation spatiale du sol et Géométrie de la stratification

La discrétisation en éléments finis volumiques du demi-espace sol infini n'est pas abordable. Il est classique pour des domaines non bornés de \mathbb{R}^3 d'avoir recours à une formulation par équation intégrale basée sur la connaissance d'une solution fondamentale qui pour le(s) milieu(x) considéré(s) en ISS s'appelle : les fonctions de Green. Cette solution est ensuite discrétisée par éléments finis de frontière ce qui permet de limiter la discrétisation spatiale du domaine et donc de ne mailler que l'(ou les) interface(s) (cf. [§5.1.3.3]).

Rappels :

Les fonctions de Green donnent la réponse « impulsionnelle » du milieu à une source ponctuelle, en l'absence de toute surface réfléchissante. La solution permet de reproduire le signal source avec un décalage correspondant au temps de trajet source-récepteur, et une décroissance du niveau proportionnelle à la distance source-récepteur.

Adaptées, les fonctions de Green peuvent prendre en compte toutes ou certaines conditions aux limites sur des obstacles. L'utilisation de ces fonctions est particulièrement utile pour les formulations intégrales des problèmes de rayonnement par les structures et de diffraction par des obstacles.

Les éléments finis de frontière construits et utilisés par PROMISS3D sont générés à partir de la « connectique » du maillage de la fondation appartenant au domaine extérieur (Code_Aster). Ce maillage doit être réalisé à partir d'éléments surfaciques linéaires ou quadratiques aux normales impérativement orientées vers l'intérieur du sol. Toutefois, il est à signaler que la présence d'éléments quadratiques sur l'interface n'apporte rien. En effet, pour PROMISS3D, les champs servant au calcul des fonctions de Green sont constants par côté d'élément (la présence de nœuds intermédiaires n'a aucun intérêt pour PROMISS3D). De plus, il est à noter que PROMISS3D possède une méthode de calcul originale qui évite de mailler l'interface entre les différentes strates du sol.

Deux cas de figure peuvent se présenter :

- **La fondation est superficielle** : Dans ce cas, il suffit d'un seul niveau source et récepteur situé sur la surface libre (au niveau supérieur de la couche de sol en contact avec l'air). Concrètement, dans le fichier **nom_étude.sol** on précise qu'une seule source est nécessaire, grâce au mot clé **SOURCE**, en indiquant si l'on résout un problème en géométrie 2D ou 3D. Le mot clé **RECEP**, qui signale la position du récepteur pour le calcul des fonctions de Green, doit apparaître sur la description de la 1ère couche. Les contraintes étant nulles à la surface libre, il est inutile de les calculer ce qui conduit à utiliser l'option **ALGO_DEPL** pour l'algorithme de calcul des fonctions de Green.

On donne ci-dessous un exemple de fichier **nom_étude.sol** commenté :

```
TITR
SOL ONGBABY      * Nom que l'on donne aux caractéristiques du sol utilisées
MATERIAU 2       * Nombre de Matériaux associées à la stratification du sol
RO      E        NU      BETA  ETA
2150 4400.E06    0.45    0.08  0.
2070 1421.E06    0.45    0.114 0.

COUCHE 2          * Description des caractéristiques mécaniques du sol
25.0 MATE 1       * Nombre de stratification prises en compte lors du calcul
RECEP            * Epaisseur et matériau associés à la couche de sol. Le
25.0 MATE 2       * récepteur est placé au sommet de la 1ère couche
                  * La couche 2 n'est pas en contact avec la fondation. On n'y place pas
                  * de récepteur
SUBS MATE 2       * Le substratum se situe, dans l'exemple, sous la 2ème couche
SOURCE 1 3D       * Fondation superficielle de structure => Une seule source
FORCE HORIZ       * La source est appliquée au sommet de la 1ère couche
POSI 1
ALGO DEPL         * Car fondation superficielle
SPEC AUTO         * Gestion automatique de l'échantillonnage des fonctions de Green
OFFSET 110/440    * Paramètre d'échantillonnage horizontal des fonctions de Green
```

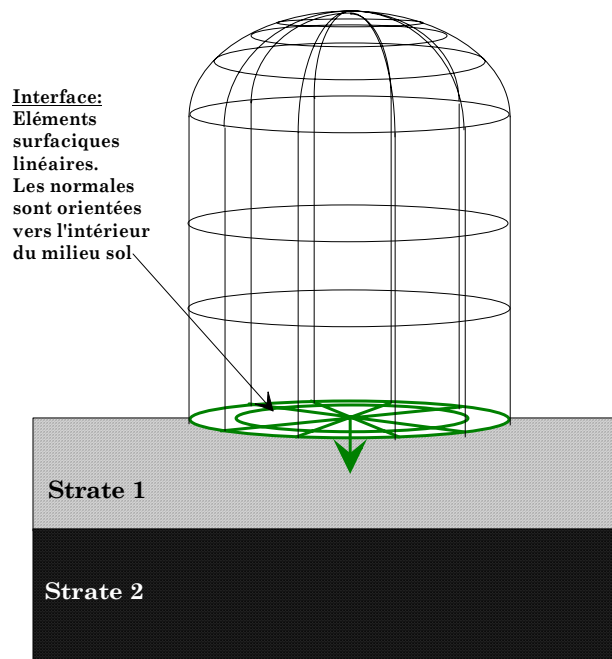


Figure 5.1.3.2-a : Représentation du sol avec fondation superficielle

- La fondation est enterrée :** On l'a vu précédemment, les éléments finis de frontière construits et utilisés par PROMISS3D sont générés à partir du maillage de la fondation appartenant au domaine extérieur (Code_Aster). Dans le cas d'un maillage coupant le volume de l'espace stratifié, il convient d'avoir plusieurs niveaux sources et récepteurs pour couvrir l'ensemble du maillage. Ainsi, sur la partie latérale de la fondation enterrée, on place :
 - un source au centre de gravité de chaque élément, ainsi qu'au niveau de la base de la fondation (cf. [Figure 5.1.3.2-b]),
 - un récepteur sur des points de Gauss de chaque élément. La règle énoncée dans PROMISS3D est de disposer au plus 6 récepteurs sur chaque élément mais il est préconisé de n'en utiliser que 4 placés au sommet de l'élément ainsi que tous les quarts de longueur de l'élément (cf. [Figure 5.1.3.2-b]).

La disposition des récepteurs et des sources dans le fichier **nom_étude.sol** est générique il convient donc d'utiliser pour la partie latérale de la fondation en contact avec le sol un maillage réglé où tous les éléments ont même hauteur (cf. [Figure 5.1.3.2-b]).

Concrètement, dans le fichier **nom_étude.sol** on précise le nombre de sources nécessaire, grâce au mot clé **SOURCE**, en indiquant si l'on résout un problème en géométrie 2D ou 3D. On applique le mot clé **RECEP** pour signaler la position des récepteurs, nécessaire au calcul des fonctions de Green, sur les couches de sol ad hoc. Lors de la prise en compte de l'enterrement d'une fondation, PROMISS3D met en oeuvre des formulations régularisées pour améliorer la précision des calculs et limiter l'effort d'intégration. Dans le cas d'une fondation enterrée il est donc impératif d'utiliser l'option **ALGO_REGU** pour l'algorithme de calcul des fonctions de Green.

On donne ci-dessous un exemple de fichier **nom_étude.sol** commenté. On suppose, pour l'exemple considéré, que la fondation est enterrée de 20m et qu'on a deux éléments sur la hauteur de la fondation (cf. [Figure 5.1.3.2-b]) :

```
TITR
SOL OTU          * Nom que l'on donne aux caractéristiques du sol utilisées
MATERIAU 2       * Nombre de matériaux associées à la stratification du sol
RO  E           NU  BETA  ETA
2150 4400.E06    0.45  0.08  0.  * Description des caractéristiques
2070 1421.E06    0.45  0.114 0.  * mécaniques du sol

COUCHE 10        * Nombre de stratification prises en compte lors du calcul
2.5  MATE 1  RECEP * La 1ère couche du sol est divisée en 9 sous-couches.
2.5  MATE 1  RECEP * Un récepteur est placé au sommet de chaque sous-couche.
2.5  MATE 1  RECEP * les 8 premières sous-couches sont en vis-à-vis avec la fondation.
2.5  MATE 1  RECEP *
2.5  MATE 1  RECEP *
2.5  MATE 1  RECEP *
2.5  MATE 1  RECEP *
2.5  MATE 1  RECEP *
5.0  MATE 1  RECEP * Reliquat de 1ère couche de sol situé en dessous de la fondation
25.0 MATE 2       * La couche 2 n'est pas en contact avec la fondation. On n'y place pas
                  * de récepteur
SUBS MATE 2       * Le substratum se situe, dans l'exemple, sous la 2ème couche
SOURCE 3 3D       * 3 (2+1) Sources placées au centre de gravité de chaque élément
                  * (2) et au niveau de la base de la fondation (1)
FORCE HORIZ POSI 3 * La source est appliquée au sommet de la 3ème sous-couche
FORCE HORIZ POSI 7 * La source est appliquée au sommet de la 7ème sous-couche
FORCE HORIZ POSI 9 * La source est appliquée au sommet de la 9ème sous-couche

ALGO REGU        * Car fondation enterrée
SPEC AUTO        * Gestion automatique de l'échantillonnage des fonctions de Green
OFFSET 110/440    * Paramètre d'échantillonnage horizontal des fonctions de Green
```

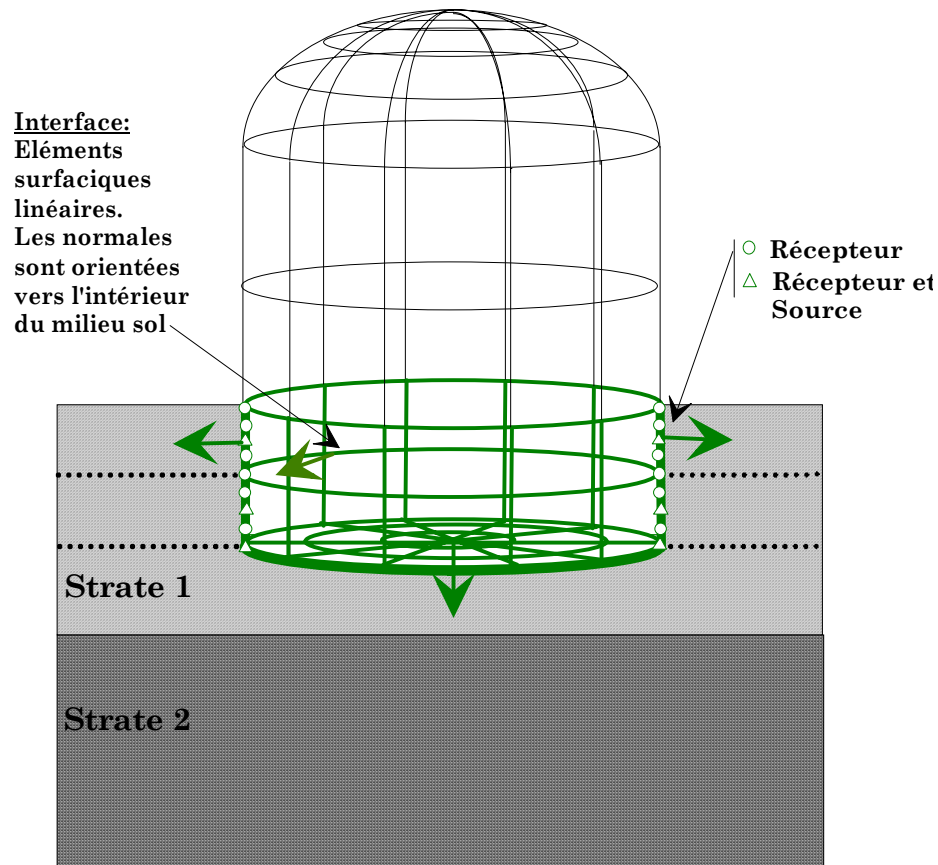


Figure 5.1.3.2-b : Représentation du sol avec fondation enterrée

Remarque :

Si sur une partie de l'enterrement, il n'y a pas de liaison rigide entre la paroi du bâtiment enterré et le sol, alors il faut définir les éléments surfaciques de cette paroi sans liaison rigide sol-bâtiment par le mot-clé `GROUP_MA_SOL_SOL` de l'opérateur `IMPR_MACR_ELEM`. De plus, il faut orienter ces éléments surfaciques vers l'extérieur du milieu sol.

5.1.3.3 Paramètres d'échantillonnage des fonctions de Green

Le calcul des fonctions de Green suit les étapes suivantes :

- décomposition de la solution en ondes planes ou cylindriques élémentaires,
- résolution du problème des ondes élémentaires par la méthodes des coefficients de réflexion-transmission,
- synthèse de la solution dans l'espace cartésien (domaine spatial) par transformée de Fourier inverse.

Les fonctions de Green sont donc échantillonnées.

Le paramètre d'échantillonnage horizontal : `OFFSET`

$$\text{OFFSET} = X_{\max} / nr$$

Avec X_{\max} longueur enveloppe à la plus grande longueur de la fondation. Pour l'îlot la longueur du radier est de 110 m $\Rightarrow X_{\max} = 110$ m.

Avec nr , nombre de points d'échantillonnage. Il est déterminé à partir de la taille moyenne des éléments de la fondation. Cette longueur pour le radier de l'îlot nucléaire est d'environ 3 m. On choisit 12 points d'échantillonnage par élément.

La distance entre 2 échantillons est alors donnée par : $d = 3.00 / 12 = 0.25\text{m}$.
Le nombre d'échantillons est donc égal à : $nr = 110 / 0.25 = 440$.

Le paramètre d'échantillonnage spectral : SPEC

SPEC = AUTO PROMISS3D gère les paramètres d'échantillonnage.

5.1.4 Le paramétrage du post-traitement spécifique à MISS3D

Il est possible, hors utilisation standard de l'interface Code_Aster-PROMISS3D, d'utiliser des outils de calculs spécifiques à MISS3D et de récupérer les résultats exploitables ou non par le Code_Aster (cf. [§4.3]).

5.1.4.1 Le calcul MISS3D avec pas de fréquence variable

Pour augmenter la précision d'un calcul d'ISS, on peut rentrer une liste de fréquences à la main. C'est dans le fichier : **nom_étude.optmis** (cf. [§ 5.1.2]) que l'on définit le nombre et la liste de fréquences sur laquelle va porter le calcul.

La commande MISS3D pour la liste de fréquence est : **LFREQ** à laquelle on doit associer une suite de valeurs correspondant aux fréquences pour lesquelles on réalisera le calcul.

LFREQ = nf avec *nf* nombre de fréquences retenues pour le calcul
f1 f2 f3 fi fn avec *fi* fréquence pour laquelle on souhaite réaliser le calcul

On donne ci-dessous un exemple de fichier **nom_étude.optmis** commenté. Dans l'exemple considéré, la fondation est superficielle, excavée de 11.60m et on regarde la réponse sur 6 fréquences précises :

```
*
* Fichier nom_etude.21 (.optmiss)
*
*
LFREQ 6                                * On effectue un calcul sur 6 fréquences.
7.1 7.2 7.3 12.3 15.7 18.9            * Liste de fréquences de calcul
Z0 -11.6                             * Fondation excavée à -11.60m
SURF                                  * Fondation superficielle
```

Nota:

Dans le fichier **nom_étude.optmis** on doit choisir l'option soit Liste de FREquence **LFREQ** ou soit échantillonnage de la FREquence : **FREQ**. Les options **LFREQ** et **FREQ** ne sont pas compatibles.

5.1.4.2 Le calcul MISS3D sur des points de contrôle.

Les points de contrôle permettent de récupérer des informations sur les champs incidents, diffractés ou rayonnés par le(s) interface(s), n'importe où dans le sol.

Pour réaliser des calculs sur des points de contrôle, on indique, dans le fichier : **nom_étude.optmis** (cf. [§ 5.1.2]), leur nombre (instruction CONT) ainsi que leurs coordonnées géométriques (x,y,z) dans le sol.

Le calcul des champs à partir des points de contrôle est post-traité aussi bien en temps qu'en fréquence par MISS3D car il n'intervient pas dans la résolution du problème couplé entre les différents sous-domaines. On doit donc définir, dans le **nom_étude.optmis** (cf. [§ 5.1.2]), un fichier de données auxiliaires (cf. [§ 4.3.2.2]) (instruction FICP) qui doit de préférence (cela est fortement conseiller) résider dans le répertoire associé à l'étude sur le serveur dédié au Code_Aster et au logiciel PROMISS3D.

Dans ce fichier de post-traitement on doit, dans l'ordre :

- 1) Stipuler si l'on souhaite réaliser un calcul dans le domaine temporel (instruction TIME) plutôt qu'en fréquentiel (option par défaut).

Nota :

Il faut spécifier la fin des calculs en temps (retour dans le domaine fréquentiel) par l'instruction FINTime.

- 2) Lire (instruction LIRE) le fichier avec l'extension **.sign** qui contient la transformée de Fourier du signal utilisé comme excitation en champs lointain lors du calcul couplé Code_Aster – PROMISS3D. Ce fichier se trouve dans le répertoire associé à l'étude sur le serveur dédié au Code_Aster et au logiciel PROMISS3D,

Nota :

Lors du post-traitement, pour des calculs en temps ou en fréquence, afin de récupérer un signal temporel cohérent avec l'excitation, la FFT du signal d'excitation en champs lointain doit être filtrée (instruction FILTRE). Dans le domaine fréquentiel MISS3D multiplie la FFT du signal d'excitation par une fenêtre d'amplitude 1 sur toute la bande de fréquence. Lors du passage dans le domaine temporel cela revient à effectuer le produit de convolution suivant :

$$\text{signal d'excitation}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} FFT^{-1}(\text{signal.sign}) * \delta(t - \tau) d\tau \text{ qui permet de}$$

décrire complètement le signal d'excitation dans le domaine temporel.

- 3) Donner le nom d'un fichier résultat temporel (ou fréquentiel) qui va contenir les déplacements, les vitesses ou les accélérations calculés au point de contrôle (instruction FICH).
- 4) Définir quel type de champ (incident, rayonné ou diffracté) va être utilisé pour le calcul. Le tableau ci-dessous rappelle l'ensemble des résultats pouvant être obtenus en post-traitement à partir de point de contrôle par MISS3D :

Instruction MISS3D	Résultats	Champ associé*
CUI	Déplacements, vitesses, accélérations	Champ incident
UCTR	Déplacements, vitesses, accélérations	Champ rayonné
CTOT**	Déplacements, vitesses, accélérations	Champ diffracté
CSOL**	Déplacements, vitesses, accélérations	Champs incident+diffracté

* Champ incident, rayonné ou diffracté par les interfaces du domaine

** **Attention** : Pour les champs diffractés **CTOT** et **CSOL** avant de définir grâce à l'instruction FICP le fichier de post traitement il faut impérativement insérer dans le fichier **nom_étude.optmis** le mot clé **CHMI** (CHaMp à l'Interface). On donne ci-dessous un exemple de fichier **nom_étude.optmis** commenté :

* Fichier Nom_étude.21 (.optmis)

FREQ .01 35.01 .25

ZO 0.

SURF

CONT 2

0. 100. 0.

0. 100. -5.4

CHMI

FICP /home/gubonva/uaster/BR/fichier.post

* Calcul entre 0.1 Hz et 35.01Hz par pas de 0.25 Hz

* Fondation non excavée

* Fondation superficielle

* 2 points de contrôle vont être utilisés pour le post-traitement

* Coordonnées (x,y,z) du 1^{er} point de contrôle

* Coordonnées (x,y,z) du 2nd point de contrôle

* Prise en compte du champ diffracté par l'interface

* Fichier de post-traitement des points de contrôle

* décrit et commenté ci-après

On peut se reporter à l'exemple de **post-traitement de points de contrôle** commenté page suivante pour obtenir un exemple de fichier de post traitement (fichier.post) en prenant garde toutefois de remplacer la commande CUI (champ incident) par CTOT ou CSOL.

Nota :

Par défaut les instructions du tableau ci-dessus délivrent des résultats en déplacement. Pour obtenir les résultats en vitesse ou en accélération il faut utiliser l'opérande *LEGENDE* suivi du mot clef *VITE* ou *ACCE*. Par exemple : CUI *LEGENDE ACCE* dans ce cas MISS3D calcule la réponse en accélération au point de contrôle .

Attention :

Il est impératif d'être cohérent sur le type de calcul à réaliser par rapport au fichier **.sign** (cf .2) exploité pour le post-traitement. Si ce fichier provient, par exemple, d'un signal en accélération il convient de rechercher un résultat en accélération.

- 5) Comme MISS3D travaille dans le domaine fréquentiel, on doit préciser, parmi toutes les fréquences échantillonnées, sur quels numéros de fréquence on désire réaliser le post-traitement (instruction *FREQ*).

Nota :

Dans le cas d'un post-traitement en temps cf. 1., il convient de sélectionner toutes les fréquences (instructions *FREQ TOUTES*), sinon un filtrage sera automatiquement appliqué.

- 6) Spécifier à partir de quel type de champs d'excitation on va réaliser le post-traitement (instruction *CHAMP*). On peut ainsi utiliser un, deux ou les trois champs relatifs aux ondes de pression et de cisaillement dans le sol du champ lointain incident.
- 7) Indiquer sur quel degrés de liberté on souhaite post-traiter (instruction *DDL*).

Nota :

en 3D :
DDL 1 correspond à la direction x
DDL 2 correspond à la direction y
DDL 3 correspond à la direction z

- 8) Définir le point de contrôle sur lequel on réalise le post-traitement (instruction *POINT*).

On donne ci-dessous un exemple de fichier **nom_étude.optmis** commenté. Pour l'exemple considéré, la fondation est superficielle, non excavée et on effectue des post-traitements sur deux points de contrôle :

* Fichier Nom_etude.21 (.optmis)

FREQ .01 35.01 .25

ZO 0.

SURF

CONT 2

0. 100. 0.

0. 100. -5.4

FICP /home/gubonva/uaster/BR/fichier.post

* Calcul entre 0.1 Hz et 35.01Hz par pas de 0.25 Hz

* Fondation non excavée

* Fondation superficielle

* 2 points de contrôle vont être utilisés pour le post-traitement

* Coordonnées (x,y,z) du 1^{er} point de contrôle

* Coordonnées (x,y,z) du 2nd point de contrôle

* Fichier de post-traitement des points de contrôle

* décrit et commenté ci-après

On donne ci-dessous un exemple de fichier de **post-traitement de points de contrôle** commenté. Pour l'exemple considéré, on recherche, les accélérations dans le domaine temporel provoqués par les champs incidents en deux points de contrôle situés à une distance de 100 m de la fondation et à des profondeurs respectives de 0.m et -5.40m (cf. [Figure 5.1.4.2-a]).

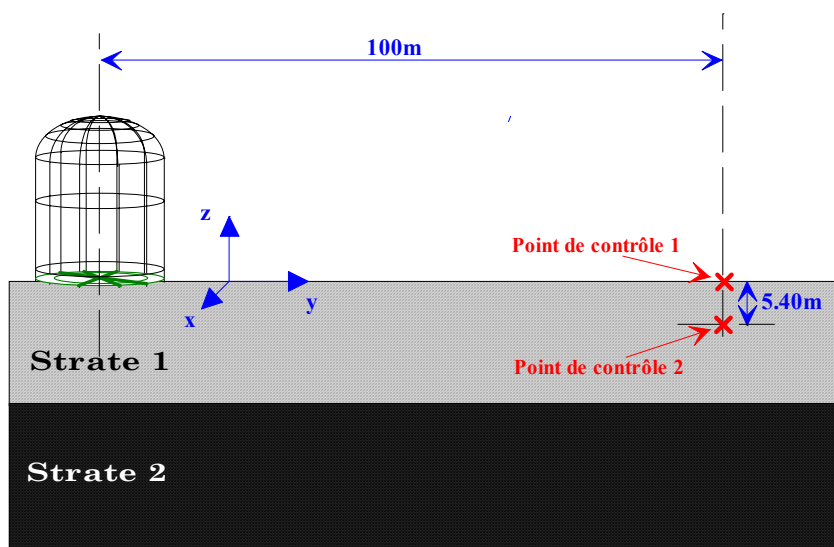


Figure 5.1.4.2-a : Exemple de points de contrôle

```
* Fichier /home/gubonva/uaster/BR/fichier.post
TIME NT=1024 TMAX=10.24
```

```
FILTRE LIRE réponse.01.sign
```

```
FICH réponse.01.p1.t
```

```
CUI LEGENDE ACCE
```

```
FREQ TOUTES
```

```
CHAMP TOUS
```

```
DDL 1
```

```
POINT 1
```

```
FICH réponse.01.p2.t
```

```
CUI LEGENDE ACCE
```

```
FREQ TOUTES
```

```
CHAMP TOUS
```

```
DDL 1
```

```
POINT 2
```

```
FINT
```

```
EOF
```

```
* Le fichier doit être placé sur le serveur Aster.
* On effectue un retour en temps pour réaliser le
* calcul. NT=nombre de pas de temps.
* TMAX=longueur de la fenêtre de temps.
* On récupère la FFT du champs incident
* calculée par MISS3D à partir d'accéléro.
* les résultats obtenus à partir du 1er point de
* contrôle seront enregistrés dans le fichier
* réponse.01.p1.t
* Calculs des accélérations associés au champ
* incident.
* On calcule les déplacements à partir de toutes
* les fréquences échantillonnées.
* les composantes horizontales et verticale du
* champ incident vont intervenir lors du calcul des
* déplacements.
* On ne calcule ici que la composante en X du
* déplacement.
* Les calculs précédemment décrit se feront sur
* le 1er point de contrôle.
* les résultats obtenus à partir du 2nd point de
* contrôle seront enregistrés dans le fichier
* réponse.01.p2.t
* Calculs des déplacements associés au champ
* incident.
* On calcule les déplacements à partir de toutes
* les fréquences échantillonnées.
* les composantes horizontales et verticale du
* champ incident vont intervenir lors du calcul des
* déplacements.
* On ne calcule ici que la composante en X du
* déplacement.
* Les calculs précédemment décrits se feront
* au 2nd point de contrôle.
* Fin des calculs en temps
* Fin de fichier
```

5.1.4.3 Le calcul MISS3D en fondation enterrée avec suppression des résonances fictives

La formulation des éléments de frontières appliquée au problème dynamique de l'interaction sol-structure peut faire apparaître des fréquences de résonances fictives qui correspondent aux fréquences d'excitation du domaine fini enfoui (fondation) dans un domaine semi-infini (le sol). Ces résonances fictives apparaissent dans certaines configurations: sols mous, grand radier (cf. [§ 4.3.1]). Pour s'en affranchir on utilise la commande RFIC dans le fichier : **nom_étude.optmis** (cf. [§ 5.1.2]). Le calcul avec l'élimination des résonances fictives peut être soit réalisé directement lors du 1^{er} calcul MISS3D soit post-traité par MISS3D après s'être rendu compte du phénomène au regard des résultats.

Nota :

La commande RFIC est très gourmande en temps de calcul. L'utiliser peut aller jusqu'à doubler les temps de calcul pour MISS3D. Il est donc conseillé d'utiliser la commande RFIC plutôt en post-traitement.

La syntaxe de la commande **RFIC** de MISS3D est la suivante :

RFIC *telemfd* avec *telemfd* taille en mètre du plus petit élément du maillage de la fondation

On donne ci-dessous un exemple de fichier **nom_étude.optmis** (cf. [§ 5.1.2]) commenté. Dans l'exemple considéré, la fondation est enterrée d'une profondeur de 6.05m. La taille du plus petit élément de la fondation est de 3 m. On regarde la réponse sur 6 fréquences précises en s'affranchissant du problème des résonances fictives:

```
*
* Fichier nom_etude.21 (.optmiss)
*
*
LFREQ 6                                * On effectue un calcul sur 6 fréquences.
7.1 7.2 7.3 12.3 15.7 18.9            * Liste de fréquences de calcul
ZO -6.05                             * Fondation enterrée à -6.05m
RFIC 3                               * Elimination des résonances fictives
```

5.1.4.4 Le calcul MISS3D avec recherche simultanée des impédances de sol

Les impédances de sol expriment la rigidité dynamique du domaine. Elles s'expriment sous forme de matrice carrée **dépendant de la fréquence**. Chaque ligne et chaque colonne de cette matrice correspond à un mode particulier, un terme de la matrice étant le travail virtuel exercé par un de ces modes sur un autre mode.

Nota :

Lors d'un calcul en temps (instruction TIME) aucune impédance de sol ne peut être calculée. MISS3D permet de calculer les impédances de sol (instruction IMPDC) en même temps que la réponse de la fondation au séisme. Pour ce calcul des impédances de sol, MISS3D réalise les mêmes calculs qu'un post-traitement avec l'opérande MISS_IMPE de la commande MACRO_MISS3D du Code_Aster.

Le résultat du calcul des impédances (matrices) est stocké dans un fichier résultat (instruction IMPE) qui doit impérativement résider dans le répertoire associé à l'étude sur le serveur dédié au Code_Aster et au logiciel PROMISS3D.

On donne ci-dessous un exemple de fichier **nom_étude.optmis** (cf. [§ 5.1.2]) commenté. Dans l'exemple considéré, la fondation est superficielle excavée d'une profondeur de 11.60m.

```
* Fichier Nom_etude.21 (.optmis)
FREQ .01 20. 0.1                      * Calcul entre 0.1 Hz et 20Hz par pas de 0.1 Hz
ZO -11.60                             * Fondation excavée à -11.60m
SURF                                  * Fondation superficielle
IMPE /home/gubonva/uaster/BR/réponse.01.impe * les impédances calculées seront enregistrés dans le
                                           * fichier réponse.01.impe
```

5.1.5 Les données en sortie de PROMISS3D

Suite au calcul par PROMISS3D, le *Code_Aster* récupère les facteurs de participation modaux pour obtenir le déplacement, la vitesse et l'accélération en tout point de la structure par recombinaison modale. Cette recombinaison peut s'écrire sous la forme :

$$u(x,t) = \sum_A \alpha_A(t) \phi_A(x) + \sum_B \alpha_B(t) \psi_B(x)$$

avec $u(x,t)$: champ de déplacement de la structure

ϕ_A, ψ_B : modes dynamiques et statiques

α_A, α_B : facteurs de participation modaux

Pour les calculs des spectres de réponse, le fichier résultat qui contient les facteurs de participations modaux se nomme **nom_étude.nn.t** (où **nn** correspond au numéro d'ordre du chargement provenant du *Code_Aster* soit l'occurrence de l'appel à la commande `IMPR_MISS_3D`). Il est créé automatiquement sous la machine centrale de traitement dans le répertoire indiqué dans la commande `MACRO_MISS_3D`.

Pour le calcul des fonctions de transfert on applique comme chargement une excitation harmonique de module 1. Cela est réalisé dans *Code_Aster* grâce à la commande `IMPR_MISS_3D`. Le fichier en sortie de PROMISS3D comportant la réponse dynamique complexe de la structure se nomme alors **nom_étude.nn.h** (où **nn** correspond au numéro d'ordre du chargement provenant du *Code_Aster* soit l'occurrence de l'appel à la commande `IMPR_MISS_3D`). Il est créé automatiquement sous la machine de traitement dans le répertoire indiqué dans la macro-commande `MACRO_MISS_3D`.

5.2 La méthode de calcul sur fondation rigide

La condition de fondation rigide est obtenue en imposant au radier du bâtiment un mouvement de corps solide (le nombre de modes statiques associé est alors réduit à 6). Pour cela on utilise les relations linéaires de type `LIAISON_SOLIDE` dans la commande `AFFE_CHAR_MECA` [U4.44.01] entre l'ensemble des nœuds de la fondation (rassemblés dans le groupe de nœud : `SRADIER`). L'ensemble des nœuds de la fondation est alors relié au nœud central : `PO`. Le déroulement du calcul se fait de la manière suivante [Figure 5.2-a] :

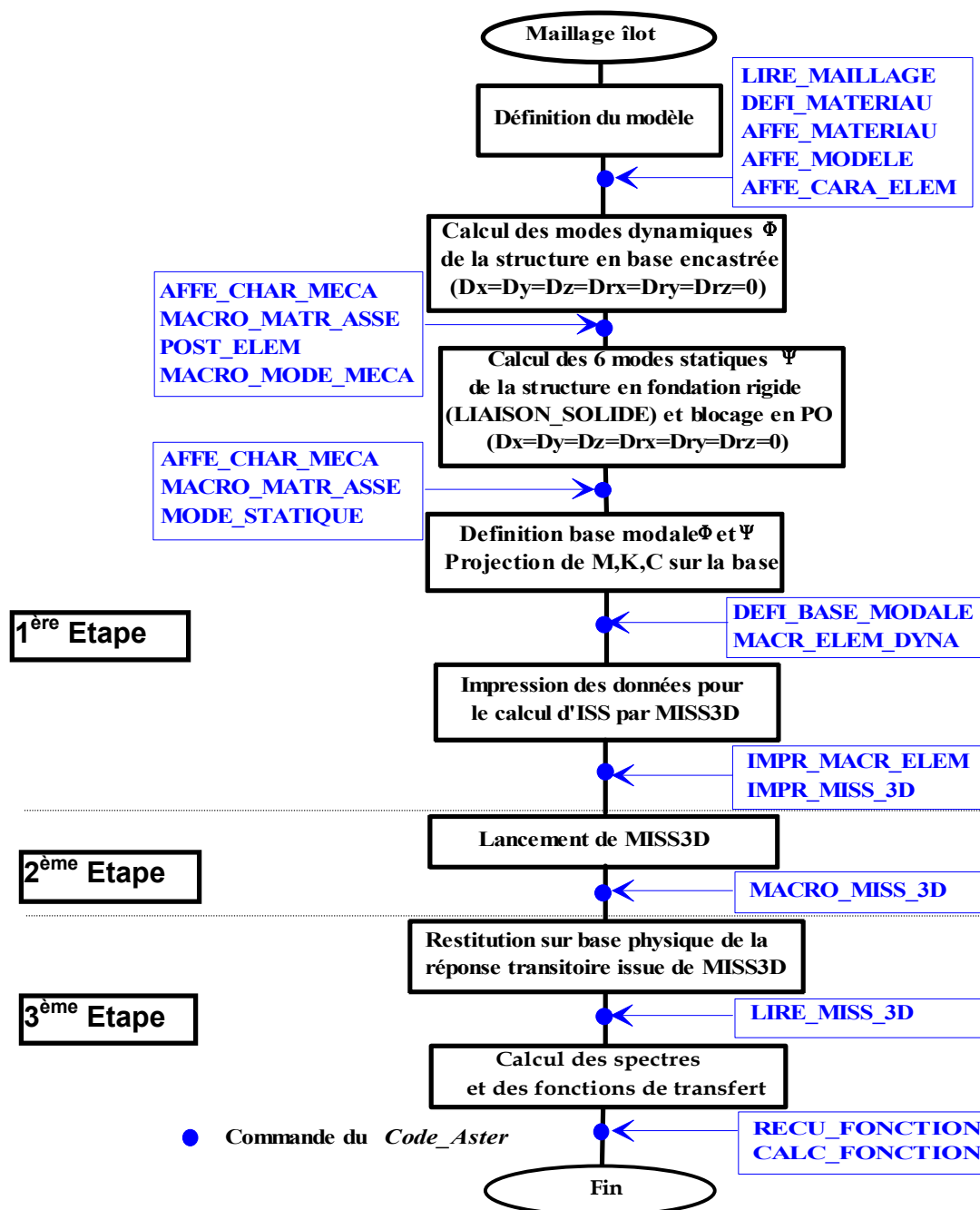


Figure 5.2-a : Synoptique du calcul sur fondation rigide

Les fichiers de commande associés sont donnés en Annexe 2.

5.3 La méthode de calcul sur fondation souple avec la totalité des modes statiques

L'interface entre la fondation et le sol est dans le cas du bâtiment déjà étudié représentée par le groupe de nœuds SRADIER sur lequel seules les translations sont bloquées ($D_x=D_y=D_z=0$) le nombre de modes statiques à calculer s'élève à 1731 qui correspond au nombre de nœuds sur la fondation (577 nœuds) multiplié par le nombre de degrés de liberté associés.
La méthode mise en oeuvre est la suivante [Figure 5.3-a] :

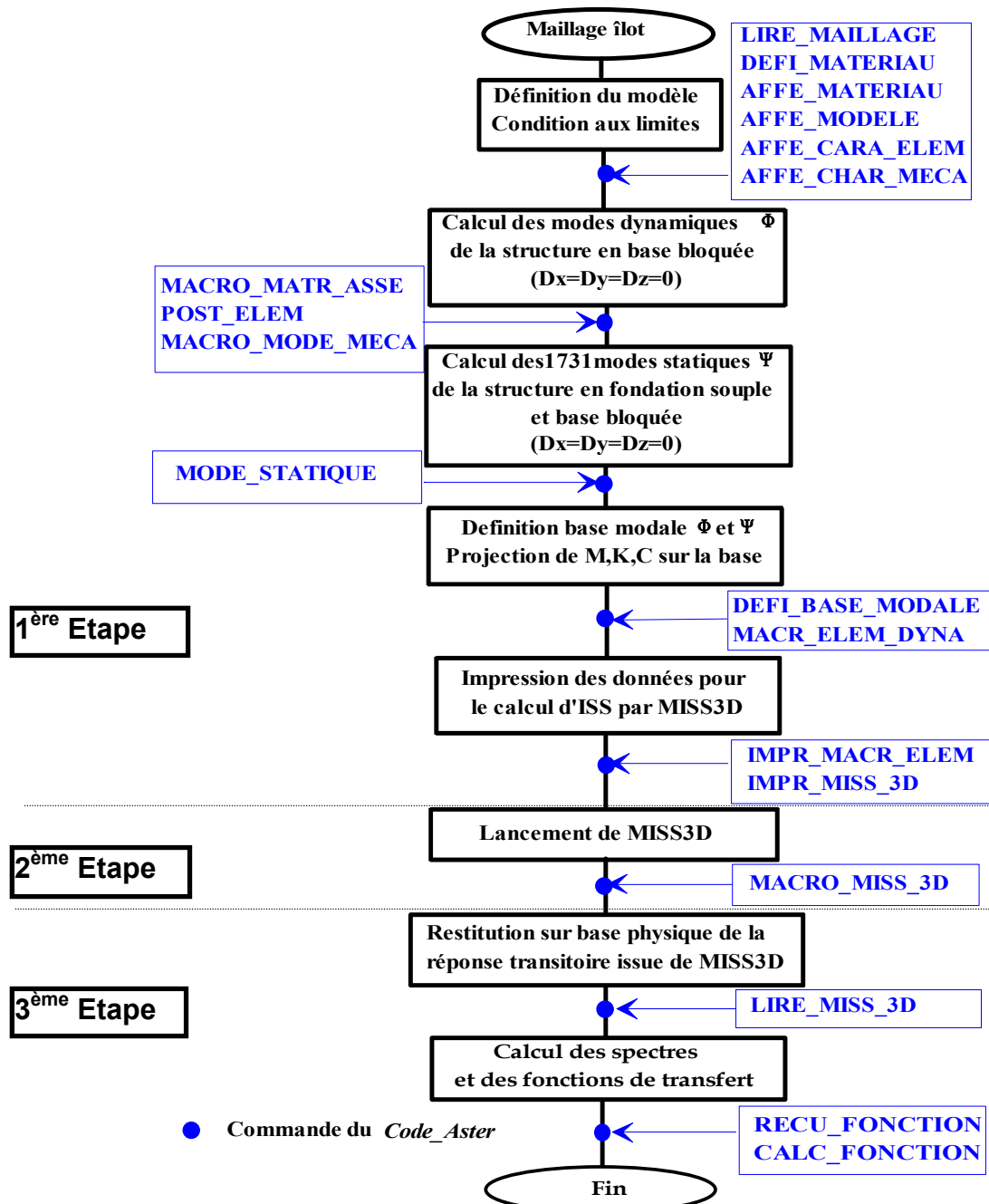


Figure 5.3-a : Synthétique du calcul sur fondation souple avec la totalité des modes statiques

Les fichiers de commandes sont donnés en Annexe 2.

5.4 La méthode de calcul sur fondation souple avec quelques modes de fondation choisis

5.4.1 Les principales étapes de la méthode

Pour le calcul d'ISS, PROMISS3D a besoin d'une base constituée à la fois de modes propres nuls sur l'interface sol-structure et d'autres modes non nuls sur cette interface. Cette base correspond à une interface de type CRAIG_BAMPTON. Pour les premiers modes, on prend généralement les modes propres de la structure obtenus en bloquant les déplacements sur l'interface (base bloquée) et pour les seconds, on prend les modes statiques dits « contraints », obtenus successivement en imposant un déplacement unitaire en chacun des degrés de liberté de chaque nœud de l'interface (la fondation).

Le principe de la méthode ici mise en oeuvre consiste à remplacer les modes statiques contraints pléthoriques par des modes propres de fondation en petit nombre calculés sur tapis de ressorts de sol et choisis selon un critère établi.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour mener à bien le calcul :

5.4.2 La détermination du tapis de ressorts à placer sous la fondation.

Les valeurs des raideurs des ressorts équivalents au sol stratifié du bâtiment sont déterminées à travers un calcul des fonctions de transfert sous sollicitation harmonique de module 1 lors de l'étude avec fondation rigide (cf [§5.2]).

On obtient les 6 valeurs de raideur du ressort globale du sol stratifié : $K_x(N/m)$, $K_y(N/m)$, $K_z(N/m)$, $K_{\theta x}(N.m)$, $K_{\theta y}(N.m)$, $K_{\theta z}(N.m)$. Ces raideurs, indépendantes de la fréquence, sont réparties au prorata des surfaces des éléments autour des nœuds de la fondation grâce à l'opérateur RIGI_PARASOL de la commande AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01] du Code_Aster.

5.4.3 Le calcul des modes dynamiques de la structure

Ce calcul s'effectue sur base encastrée avec la commande MODE_ITER_SIMULT (on applique sur tous les nœuds de la fondation la condition aux limites suivante : $D_x=D_y=D_z=Dr_x=Dr_y=Dr_z=0$).

5.4.4 Le calcul des modes propres de fondation sur tapis de ressort

Lors du calcul, on dissocie les modes avec déplacements non nuls de l'infrastructure (radier) des modes de la superstructure (bâtiments ...) en considérant que seul le radier est pesant. Ceci est réalisé en appliquant, aux éléments ne modélisant pas la fondation, un matériau dont la masse volumique est nulle. On évite ainsi, lors de la construction de la base modale regroupant les modes de fondation et dynamiques de la structure, de considérer deux fois les modes propres de la superstructure.

On enrichit ensuite la base modale établie au [§5.4.3], via la commande DEFI_BASE_MODAL, par les premiers modes calculés qui sont tous des modes de fondation puisque sont rejetés vers les hautes fréquences tous les modes de la superstructure.

5.4.5 La sélection des modes

En réduisant considérablement le nombre de modes de fondation contraints on peut arriver à retrouver la solution en réponse et fréquence de résonance obtenue avec la méthode précédente mettant en oeuvre la totalité des modes statiques (cf. [§5.3]) et permettant un gain de temps de calcul substantiel. On juge que la méthode de réduction est intéressante, en terme de gain de temps, lorsque le nombre de modes propres de fondation sur tapis de ressort est au plus égal au tiers du nombre de modes statiques sur fondation souple (pour cette étude, la méthode est intéressante si le nombre de modes de fondation sur tapis de ressort est inférieur à $1731 / 3 \approx 500$ modes cf. [§5.3]).

Pour affiner la sélection des modes, on peut utiliser la méthode préconisée par E. Balmes [bib2] qui consiste à ne retenir que les modes de fondation dont la fréquence propre reste inférieure à deux fois la fréquence de coupure utilisée lors du calcul des modes dynamiques [Figure 5.4.5-a].

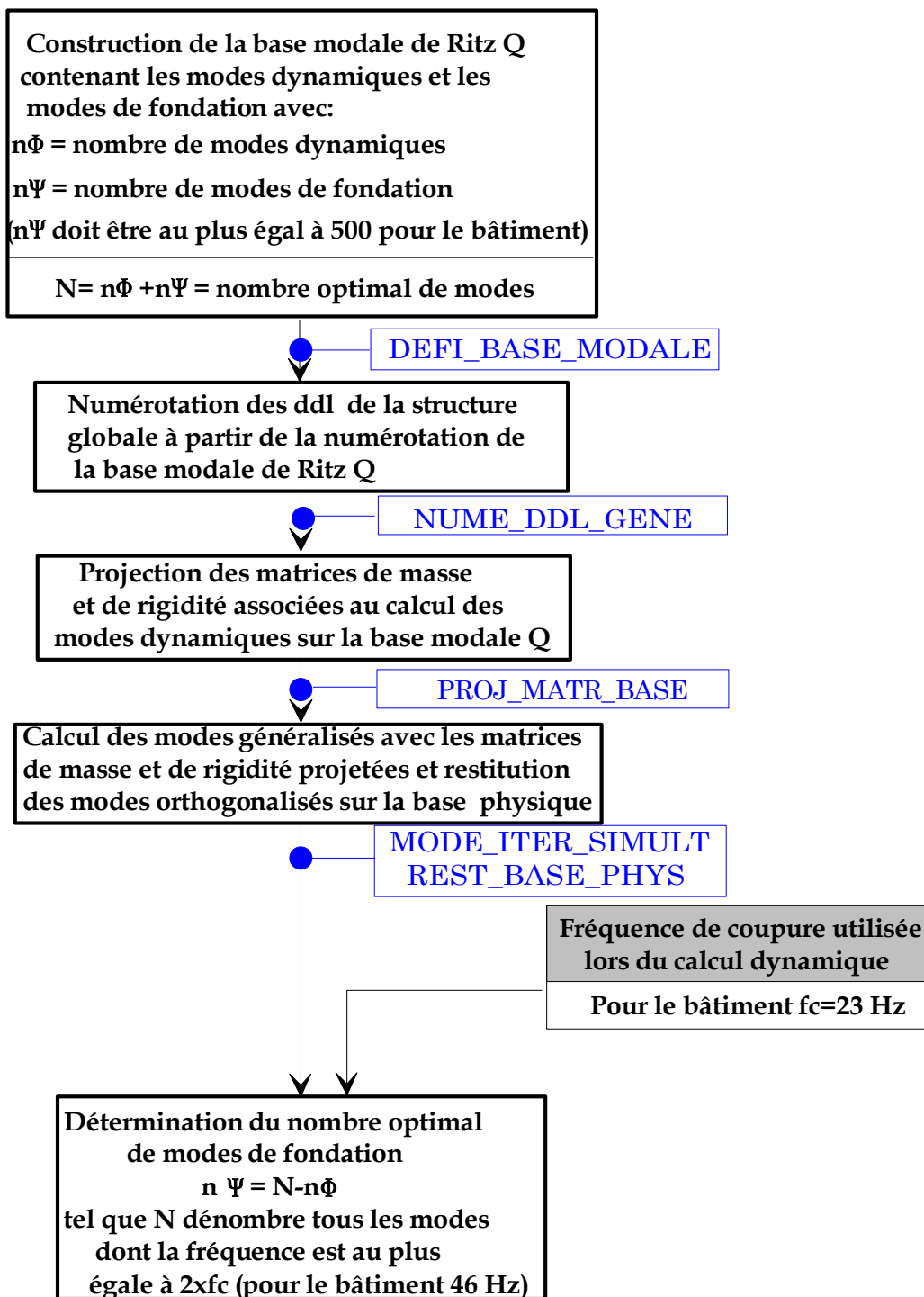


Figure 5.4.5-a : Optimisation du nombre de modes de fondation

Le déroulement du calcul complet avec réduction des modes de fondation se fait de la façon suivante [Figure 5.4.5-b] :

Avertissements :

* Pour les modes de fondation, contrairement au calcul des modes dynamiques, les nœuds du radier n'ont aucune contrainte sur leurs déplacements. Pour calculer le macro-élément dynamique de la structure il faut donc adapter deux numérotations liées à des conditions limites différentes (blocage à l'interface pour les modes dynamiques ou tapis de ressorts ponctuels pour les modes de fondation).

** On évite, lors de la construction de la base modale (regroupant les modes de fondation et dynamiques de la structure), de prendre en compte deux fois les modes propres des principales sous structures : enceintes, structures internes,... en considérant que seul le radier est pesant et en appliquant aux éléments modélisant la superstructure des matériaux à masse volumique quasi nulle ($\rho=10^{-3} \text{ kg/m}^3$).

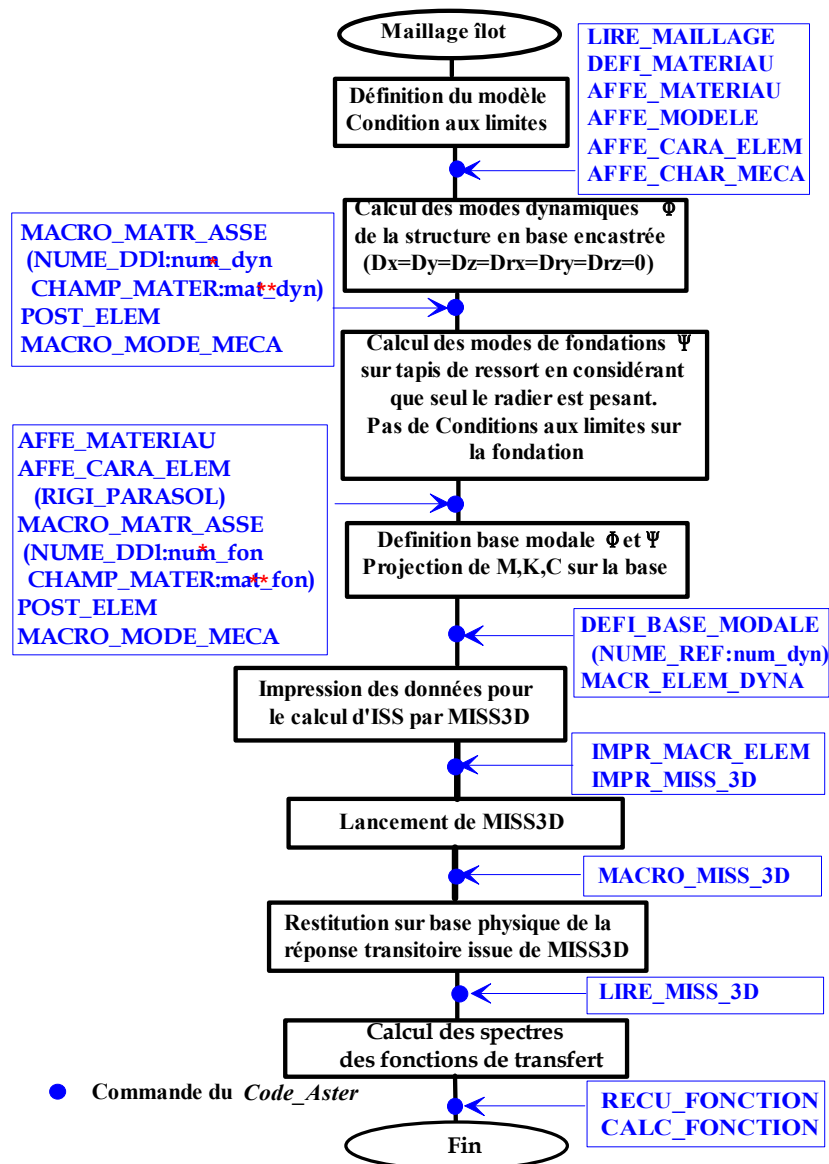


Figure 5.4.5-b : Synoptique du calcul avec modes de fondation sur tapis de ressort

On peut réaliser une étude paramétrique sur le nombre de modes de fondation. La méthode mise en oeuvre a été évaluée [bib4] et a consisté à faire une poursuite sur une base contenant les 171 modes dynamiques et 500 modes de fondation et à ne retenir lors de la définition de la base modale que 80, puis 30 et enfin 20 modes de fondation. Cette opération a été réalisée en modifiant en poursuite le nombre de modes de fondation par l'opérande `NMAX_MODE` de la commande `DEFI_BASE_MODAL`, puis en recommençant la chaîne d'appel aux opérateurs successifs à partir de cet opérateur jusqu'au post-traitement.

A noter que, sur cette étude, lorsqu'on utilise la méthode de réduction des modes, on trouve que seule une quarantaine de modes de fondation sont nécessaires pour reproduire l'effet induit par les 1731 modes statiques.

6 Bibliographie

- [1] D. CLOUTEAU : Manuel utilisateur de PROMISS3D - MISS2D, révision 6.3, par (LMSSM Ecole Centrale de Paris)
- [2] E. BALMES : Use of generalized interfaces degrees of freedom in component mode synthesis IMAC 1996
- [3] V. GUYONVARH - G. DEVESA : Méthodes de calcul des excitations sismiques aux ouvrages du CPP N4. HP-52/99/006/A
- [4] V. GUYONVARH - G. DEVESA : Méthodes pour considérer l'interaction sol-structure sur l'îlot nucléaire EPR avec le Code_Aster et MISS3D. HP-62/00/007/A

Annexe 1 Les fichiers de mise en donnée de PROMISS3D

```
*
* Fichier miss01.21 (.optmiss)
*
*
FREQ 0.1 20. 0.1
Z0 -11.6
SURF

*
* Fichier miss01a.22 (.sol)
*
TITR
SOL PENLY
MATERIAU 4
RO      E      NU      BETA      ETA
2150    4480.E06    0.40      0.08      0.
2070    1421.E06    0.45      0.114     0.
2150    1305.E06    0.45      0.16      0.
2400    6000.E06    0.45      0.06      0.
COUCHE 3
43.9    MATE 1 RECEP
31      MATE 2
38.5    MATE 3
SUBS    MATE 4
SOURCE 1 3D
FORCE HORIZ POSI 1
ALGO DEPL
* SPEC 0.12 / 16384
SPEC AUTO
OFFSET 110 / 400
```

Annexe 2 Fichiers de commandes Aster

A2.1 Partie commune initiale

```
# *****
#                               Fichier de commande = miss01.comm
# *****
DEBUT ();
#
mail = LIRE_MALLAGE ();
#
#
# -----
# definitions du modele et des groupe de mailles
# -----
#
#
# INCLUDE ( UNITE = 11 );
#
# -----
# definition des materiaux
# -----
#
# INCLUDE ( UNITE = 12 );
#
# -----
# definition des caracteristiques des elements
# -----
#
# INCLUDE ( UNITE = 13 );
#
# -----
# definition de la fondation
# -----

&mail = DEFI_GROUP (
                                MAILLAGE      = mail,
                                CREA_GROUP_NO  =_F(
                                                GROUP_MA ='SRADIER',
                                                ),
                                );
```

A2.2 Cas Fondation rigide

```
#
# *****
#          CONDITION DE RIGIDITE DU RADIER
#          CONDITION AUX LIMITES BASE BLOQUEE EN DYNAMIQUE
#
ch_cldyn = AFFE_CHAR_MECA (
    MODELE      = modele,
    DDL_IMPO    =_F( GROUP_NO ='SRADIER',
                    DX = 0.,
                    DY = 0.,
                    DZ = 0.,
                    DRX = 0.,
                    DRY = 0.,
                    DRZ = 0.,
                    ),
    );
```

```
*****
#
#           RESOLUTION DU PROBLEME MODAL DYNAMIQUE
#
#   CALCULS ELEMENTAIRES des matrices de masse et de raideur
#   NUMEROTATION des inconnues du probleme
#   ASSEMBLAGE des matrices de masse et de raideur
#
#
#   MACRO_MATR_ASSE (MODELE= modele,
#                   CHAM_MATER= mater,
#                   CARA_ELEM= elem,
#                   CHARGE= ch_cldyn,
#                   NUME_DDL= num_dyn,
#                   MATR_ASSE=_F(MATRICE= matrigi,
#                               OPTION= 'RIGI_MECA'),
#                   MATR_ASSE=_F(MATRICE= matmass,
#                               OPTION= 'MASS_MECA'),
#                   MATR_ASSE=_F(MATRICE= matamor,
#                               OPTION= 'AMOR_MECA'),
#                   );
#
#-----
#   calcul des masses
#-----
#
#
#
#   masses = POST_ELEM (
#                   MODELE      = modele,
#                   INFO        = 1
#                   CHAM_MATER  = mater,
#                   CARA_ELEM   = elem,
#                   MASS_INER   =_F(
#                               TOUT      = 'OUI'
#                               ),
#                   );
#
#
#-----
#   calcul des modes propres par bandes successives
#-----
#
#
#   mod_dyn = MACRO_MODE_MECA( MATR_A= matrigi, MATR_B= matmass,
#                             CALC_FREQ =_F(
#                                 FREQ = (0.1, 7., 10., 12.,14. ,16., 17., 19.,
#                                         21., 23.),
#                                 ),
#                             NORM_MODE=_F(MASS_INER=masses),
#                             FILTRE_MODE=_F( SEUIL= 1.D-3 ),
#                             IMPRESSION=_F( ),
#                             );
#
```

```
#####
#          CONDITION DE RIGIDITE DU RADIER
#          CONDITION AUX LIMITES BASE BLOQUEE EN STATIQUE
#####

ch_clsta = AFFE_CHAR_MECA (
                                MODELE      = modele,

                                DDL_IMPO =_F( GROUP_NO = 'PO',
                                DX = 0.,
                                DY = 0.,
                                DZ = 0.,
                                DRX = 0.,
                                DRY = 0.,
                                DRZ = 0.,
                                ),

                                LIAISON_SOLIDE =_F( GROUP_NO = 'SRADIER'),
                                );

#####
#          RESOLUTION DU PROBLEME MODAL STATIQUE
#
#          CALCULS ELEMENTAIRES des matrices de masse et de raideur
#          NUMEROTATION des inconnues du probleme
#          ASSEMBLAGE des matrices de masse et de raideur
#
MACRO_MATR_ASSE ( MODELE= modele,
                  SOLVEUR=_F(METHODE= 'MULT_FRONT'),
                  CARA_ELEM= elem,
                  CHARGE= ch_clsta,
                  CHAM_MATER= mater,
                  NUME_DDL= num_sta,
                  MATR_ASSE=_F( MATRICE= rigistat, OPTION= 'RIGI_MECA'),
                              ( MATRICE= massetat, OPTION= 'MASS_MECA'),
                  );

#
#
# CALCUL DU MACRO-ELEMENT DYNAMIQUE =
#-----
#
mod_sta = MODE_STATIQUE( MATR_RIGI= rigistat,
                        MATR_MASS= massetat,
                        DDL_IMPO=_F(GROUP_NO= 'PO',
                        TOUT_CMP= 'OUI'),
                        );

basmo = DEFI_BASE_MODEALE (
                        RITZ=_F(MODE_MECA= mod_dyn ),
                        RITZ=_F(MODE_STAT= mod_sta,
                        NMAX_MODE= 6),
                        NUME_REF= num_dyn);

#
mael = MACR_ELEM_DYNA (BASE_MODEALE= basmo,
                      MATR_RIGI= matrigi,
                      MATR_MASS= matmass,
                      OPTION= 'RITZ');
```

A2.3 Cas Fondation souple avec tous les modes statiques

```
#
#*****
#      CONDITION DE RIGIDITE DU RADIER
#      CONDITION AUX LIMITES BASE BLOQUEE EN DYNAMIQUE
#
ch_cldyn = AFFE_CHAR_MECA (
    MODELE = modele,
    DDL_IMPO =_F( GROUP_NO = 'SRADIER',
        DX = 0.,
        DY = 0.,
        DZ = 0.,
    ),
);

#*****
#      RESOLUTION DU PROBLEME MODAL DYNAMIQUE
#
#      CALCULS ELEMENTAIRES des matrices de masse et de raideur
#      NUMEROTATION des inconnues du probleme
#      ASSEMBLAGE des matrices de masse et de raideur
#
#
MACRO_MATR_ASSE (MODELE= modele,
    CHAM_MATER= mater,
    CARA_ELEM= elem,
    CHARGE= ch_cldyn,
    NUME_DDL= num_dyn,
    MATR_ASSE=_F(MATRICE= matrigi,
        OPTION= 'RIGI_MECA'),
    MATR_ASSE=_F(MATRICE= matmass,
        OPTION= 'MASS_MECA'),
    MATR_ASSE=_F(MATRICE= matamor,
        OPTION= 'AMOR_MECA'),
);

#
#-----
#      calcul des masses
#-----
#
#
#
masses = POST_ELEM (
    MODELE = modele,
    INFO = 1,
    CHAM_MATER = mater,
    CARA_ELEM = elem,
    MASS_INER =_F(
        TOUT = 'OUI'
    ),
);

#
#
```



```
# -----
# calcul des modes propres par bandes successives
# -----
#
#
mod_dyn = MACRO_MODE_MECA( MATR_A= matrigi, MATR_B= matmass,
                          CALC_FREQ =_F(
                              FREQ = (0.1, 7., 10., 12., 14., 16., 17., 19.,
                                      21., 23.),
                              ),
                          NORM_MODE=_F(MASS_INER=masses),
                          FILTRE_MODE=_F( SEUIL= 1.D-3 ),
                          IMPRESSION=_F( ),
                          );

#
# CALCUL DU MACRO-ELEMENT DYNAMIQUE =
#-----
#
#
mod_sta = MODE_STATIQUE( MATR_RIGI= matrigi,
                        MATR_MASS= matmass,
                        DDL_IMPO=_F(GROUP_NO= 'SRADIER',
                                    AVEC_CMP= ('DX', 'DY' , 'DZ' ),
                                    ),
                        );

basmo = DEFI_BASE_MODEALE (
    RITZ=_F(MODE_MECA= mod_dyn),
    # 577 noeuds a l'interface
    # => 577*3=1731 modes statiques
    RITZ =_F(NMAX_MODE= 1800,
            MODE_STAT=mod_sta),
    NUME_REF= num_dyn);

#

mael = MACR_ELEM_DYNA (BASE_MODEALE= basmo,
                      MATR_RIGI= matrigi,
                      MATR_MASS= matmass,
                      OPTION= 'RITZ');
```

A2.4 Cas Fondation souple avec réduction de modes

```
#
#*****
#          CONDITION DE RIGIDITE DU RADIER
#          CONDITION AUX LIMITES BASE BLOQUEE EN DYNAMIQUE
#
ch_cldyn = AFFE_CHAR_MECA (
    MODELE      = modele,
    DDL_IMPO =_F( GROUP_NO = 'SRADIER',
                  DX = 0.,
                  DY = 0.,
                  DZ = 0.,
                  DRX = 0.,
                  DRY = 0.,
                  DRZ = 0.,
                  ),
    );

#
```

```
#####
#
# RESOLUTION DU PROBLEME MODAL DYNAMIQUE
#
# CALCULS ELEMENTAIRES des matrices de masse et de raideur
# NUMEROTATION des inconnues du probleme
# ASSEMBLAGE des matrices de masse et de raideur
#
#
# MACRO_MATR_ASSE (MODELE= modele,
#                  CHAM_MATER= mater,
#                  CARA_ELEM= elem,
#                  CHARGE= ch_cldyn,
#                  NUME_DDL= num_dyn,
#                  MATR_ASSE=_F(MATRICE= matrigi,
#                               OPTION= 'RIGI_MECA'),
#                  MATR_ASSE=_F(MATRICE= matmass,
#                               OPTION= 'MASS_MECA'),
#                  MATR_ASSE=_F(MATRICE= matamor,
#                               OPTION= 'AMOR_MECA'),
#                  );
#
# -----
# calcul des masses
# -----
#
#
# masses = POST_ELEM (
#                  MODELE      = modele,
#                  INFO        = 1,
#                  CHAM_MATER  = mater,
#                  CARA_ELEM   = elem,
#                  MASS_INER   =_F(
#                               TOUT      = 'OUI'
#                               ),
#                  );
#
#
# -----
# calcul des modes propres par bandes successives
# -----
#
#
# mod_dyn = MACRO_MODE_MECA( MATR_A= matrigi, MATR_B= matmass,
#                  CALC_FREQ =_F(
#                  FREQ = (0.1, 7., 10., 12., 14., 16., 17., 19.,
#                          21., 23.),
#                  ),
#                  NORM_MODE=_F(MASS_INER=masses),
#                  FILTRE_MODE=_F( SEUIL= 1.D-3 ),
#                  IMPRESSION=_F( ),
#                  );
#
#
#
```

```
#####
#          DEFINITION DE CARACTERISTIQUES DE SOL PRISES EN COMPTE
#          PAR UN TAPIS DE RESSORTS
#####
#          SOL HOMOGENE PENLY
#          =====
#
elemb = AFFE_CARA_ELEM( ....(idem autres cas),...
  RIGI_PARASOL=_F(
    GROUP_MA= 'SRADIER',
    COEF_GROUP= 1.,
    GROUP_NO_CENTRE= 'PO',
    CARA= 'K_TR_D_N' ,
    VALE= (5.4E11, 5.4E11, 6.0E11,
           6.5E14, 6.5E14, 1.09E15),
  ),
);

#
#
#*****
#          RESOLUTION DU PROBLEME MODAL DE FONDATION
#          =====
#
#          CALCULS ELEMENTAIRES des matrices de masse et de raideur
#          NUMEROTATION des inconnues du probleme
#          ASSEMBLAGE des matrices de masse et de raideur
#
#
MACRO_MATR_ASSE ( MODELE= modele,
  SOLVEUR=_F(METHODE= 'MULT_FRONT'),
    CARA_ELEM= elemb,
    # CHARGE= ch_clsta,
    CHAM_MATER= materb,
    NUME_DDL= num_stab,
    MATR_ASSE=_F( MATRICE= rigistat, OPTION= 'RIGI_MECA'),
      ( MATRICE= massetat, OPTION= 'MASS_MECA'),
    );
#
#
#-----
#          calcul des masses reduites a la fondation
#-----
#
#
#
masseb = POST_ELEM (
    MODELE      = modele,
    INFO        = 1,
    CHAM_MATER  = materb,
    CARA_ELEM   = elemb,
    MASS_INER   =_F(
      TOUT      = 'OUI'
    ),
  );
```

```
#
#
# -----
# calcul des modes propres par bandes successives
# -----
#
# Le calcul des modes de "fondation" est realise a partir de
# La structure sur laquelle on ne garde que la masse du radier
# car on veut que les modes avec deplacement non nul de la fondation
# et on ne veut pas recuperer une seconde fois les modes locaux de la
# structure (mode de balancement des enceintes, des SI, ....),.
#
# La methode de reduction des modes est interessante
# lorsque le nombre de modes de "fondation" est au plus egal au tiers
# du nombre de modes statiques de reference. Pour l'ilot, on a
# 577 noeuds sur l'interface soit 577*3=1731 modes statiques.
# A l'aide d'IMPR_STURMs on a etabli la bande de frequence qui
# nous permet de garder 500 modes.
#
mod_sta = MACRO_MODE_MECA( MATR_A= rigistat, MATR_B= massetat,
                          CALC_FREQ =_F(
                              FREQ = (0.1, 60., 100., 130., 160., 200., 300.,
                                      2000., 4000., 6000.),
                              ),
                          NORM_MODE=_F(MASS_INER=masseb),
                          # FILTRE_MODE=_F( SEUIL= 1.D-3 ),
                          IMPRESSION=_F( ),
                          );
#
#
# On definit notre base modale en combinant lors de notre 1er essai
# les 171 modes dynamiques de la structure en base encastree et 80
# modes "statiques" (fondation) avec fondation sur tapis de ressort.
#
basmo = DEFI_BASE_MODAL (
    RITZ=_F(MODE_MECA= mod_dyn ),
    RITZ=_F(MODE_MECA= mod_sta,
            NMAX_MODE= 80),
    NUME_REF= num_dyn);

mael = MACR_ELEM_DYNA (BASE_MODAL= basmo,
                      MATR_RIGI= matrigi,
                      MATR_MASS= matmass,
                      OPTION= 'RITZ');
```

A2.5 Partie commune : écriture du fichier .raster et lancement de PROMISS3D

```
#-----  
#   LECTURE DES ACCELEROGRAMMES (Penly),  
#-----  
#  
#-----  
#   DEFI_FONCTION = UL 31  
#   Accelerogramme = acc1.c2  
#   (issu du spectre de sol Penly),  
#-----  
#   DEFI_FONCTION = UL 32  
#   Accelerogramme = acc2.c2  
#   (issu du spectre de sol Penly),  
#-----  
#   DEFI_FONCTION = UL 33  
#   Accelerogramme = acc3.c2  
#   (issu du spectre de sol Penly),  
#  
#   INCLUDE ( UNITE = 31 );  
#  
#   acce_x = CALC_FONCTION (  
#               COMB =_F(  
#                   FONCTION = accel,  
#                   COEF      = 9.81,  
#               ),  
#   );  
#  
#   INCLUDE ( UNITE = 32 );  
#  
#   acce_y = CALC_FONCTION (  
#               COMB =_F(  
#                   FONCTION = acce2,  
#                   COEF      = 9.81,  
#               ),  
#   );  
#  
#   INCLUDE ( UNITE = 33 );  
#  
#   acce_z = CALC_FONCTION (  
#               COMB =_F(  
#                   FONCTION = acce3,  
#                   COEF      = 6.54,  
#               ),  
#   );  
#  
#   PRE-TRAITEMENT DE PROMISS3D=  
#-----  
#   MAILLAGE ET IMPEDANCES D'INTERFACE  
#  
#   IMPR_MACR_ELEM (  
#       MACR_ELEM_DYNA = mael,  
#       FORMAT         = 'MISS_3D',  
#       SOUS_TITRE      = 'miss01',  
#       IMPR_MODE_STAT= 'OUI',  
#       IMPR_MODE_MECA= 'NON',  
#  
#   AMOR_REDUIT      =_F(  
#  
#       7.00000E-02,  7.00000E-02,  7.00000E-02,  7.00000E-02,  7.00000E-02,  
#       5.00000E-02,  5.00000E-02,  7.00000E-02,  7.00000E-02,  7.00000E-02,  
#       7.00000E-02,  7.00000E-02,  7.00000E-02,  7.00000E-02,  7.00000E-02,
```

[illegible]

```
# TRANSMISSION DES DONNES ASTER A PROMISS3D
# CREATION DU FICHER = nom_etude.RASTER SUR l'UNITE 26
IMPR_MISS_3D (
    MACR_ELEM_DYNA = mael,
    INST_INIT      = 0.,
    INST_FIN       = 20.,
    PAS            = 0.01,
    EXCIT_SOL      =_F(
        DIRECTION  =(1., 0., 0.),
        NOM_CHAM   = 'ACCE',
        FONC_SIGNAL = acce_x,
    ),
    EXCIT_SOL      =_F(
        DIRECTION  =(1., 0., 0.),
        NOM_CHAM   = 'ACCE',
        FONC_SIGNAL = acce_y,
    ),
    EXCIT_SOL      =_F(
        DIRECTION  =(1., 0., 0.),
        NOM_CHAM   = 'ACCE',
        FONC_SIGNAL = acce_z,
    ),
);

FIN();

#
# TRAITEMENT DE PROMISS3D PAR EXEC_LOGICIEL
#-----
#
# Réponse transitoire de la structure
# soumise au chargement sismique
#
POURSUITE();
MACRO_MISS_3D(
    OPTION =_F(TOUT= 'OUI'),
    PROJET= 'miss01',
    REPERTOIRE= './uaster/miss01/',
    UNITE_IMPR_ASTER= 26,
    UNITE_OPTI_MISS= 21,
    UNITE_MODELE_SOL= 22,
);

FIN();
```

A2.6 Partie commune : post-traitement de PROMISS3D et dépouillement

```
#
#=====
#           Programme = miss01a_FDT.comm
#           CALCUL DES FONCTIONS DE TRANSFERT
#=====
#
POURSUIITE();
#
#=====
#           CALCUL DES FONCTIONS DE TRANSFERT
#           SUR L'ILOT NUCLEAIRE
#   On donne ici a titre d'exemple que le post-traitement sur les Structures
#   internes à 1.50m
#=====
#
#
dyna = LIRE_MISS_3D(MACR_ELEM_DYNA= mael,
                   TYPE_RESU= 'HARMO',
                   TITRE= 'HARM_ACCE_EPR',
                   UNITE=28);

#
#
#-----
# STRUCTURE INTERNE
#-----
#
# Z=1.50 m
#=====
#
Hsilx = RECU_FONCTION(
                   RESULTAT= dyna,
                   GROUP_NO= 'NSIEZ3',
                   NOM_CHAM= 'ACCE',
                   NOM_CMP= 'DX');

#
#
IMPR_COURBE(FORMAT = 'AGRAF',
            FICHER = 'AGRAF',
            SORTIE = 'COULEUR',
            TITRE_GRAPHIQUE= 'Fonctions SI a 1.50m',
            ECHELLE_X = 'LIN',
            ECHELLE_Y = 'LIN',
            LABEL_X = 'frequence (Hz)',
            PRESENTATION = 'PAYSAGE',
            DATE = 'OUI',
            COURBE = _F(
                   FONCTION = Hsilx ),
            COURBE = _F(
                   PARTIE= 'IMAG',
                   FONCTION = Hsilx ),
            );
```



```
#=====
#           Programme = miss01a_trans.comm
#           CALCUL DES SPECTRES DE REPONSE
#=====
#
POURSUITE();
#
#-----
#           POURSUITE APRES CALCUL MISS
# -----
#
#=====
#           CALCUL DES REPONSES TRANSITOIRES
#           SUR L'ILOT NUCLEAIRE
# On donne a titre d'exemple les calculs sur les structures internes
#=====
#
resugene = LIRE_MISS_3D (MACR_ELEM_DYNA = mael,
                        TYPE_RESU = 'TRANS',
                        TITRE = 'TRANSIT',
                        UNITE=28 );
#
  l_freq = (
    0.200,    0.350,    0.500,    0.650,    0.950,
    1.100,    1.250,    1.400,    1.550,    1.700,
    1.850,    2.000,    2.150,    2.300,    2.450,    2.600,
    2.750,    2.900,    3.075,    3.300,    3.525,    3.800,
    4.100,    4.400,    4.700,    5.000,    5.375,
    5.750,    6.125,    6.500,    6.875,
    7.250,    7.625,    8.000,    8.750,    9.500,    10.250,
    11.000,   11.750,   12.500,   13.250,   14.000,   14.750,
    16.000,   17.500,   20.000,   23.500,   28.000,   32.500,
    37.000,   41.500,   46.000,   50.500,   56.000,   62.000,
    74.000,   80.000,   86.000,   92.000,   98.000 );

  l_amor_s = ( 0.04);

#----- Structures internes A 1.50 m -----
#
  SIAZdXr = RECU_FONCTION (
    RESULTAT = resugene,
    NOM_CHAM = 'ACCE',
    TITRE= 'ACCELERATION ABSOLUE SI Z=1.50 m O DEGR EXT EN X',
    GROUP_NO = 'NSIAZ3'
    NOM_CMP   = 'DX',   INTERPOL = 'LIN',
    );
# =====
#           CALCUL DES SPECTRES
# =====
  SIAZdXs = CALC_FONCTION (
    SPEC_OSCI =_F(
      FONCTION = SIAZdXr,
      FREQ      = l_freq,
      AMOR_REDUIT= l_amor_s) );
```

Page laissée intentionnellement blanche.