

SDNX101 - Vérification du chaînage MISS3D-Code_Aster pour le décollement dynamique de fondation en ISS

Résumé :

Ce test de non régression met en œuvre un mode d'utilisation de *Code_Aster* pour traiter le problème non linéaire de décollement de fondation d'un bâtiment avec prise en compte d'interaction sol-structure (ISS) en analyse dynamique. L'ISS est alors modélisée par un tapis de ressorts de sol recalé à partir de l'impédance de sol déterminée au moyen du chaînage de *Code_Aster* avec le logiciel MISS3D.

On y présente comme cas d'application le cas standard d'un bâtiment soumis à une excitation sismique traité avec une représentation souple de la fondation ayant pour conséquence la prise en compte totale des modes de déformation du radier associée à des caractéristiques de type `RIGI_MISS_3D`.

Les déplacements maximaux obtenus en bord de fondation par un calcul dynamique avec `DYNA_NON_LINE` constituent un premier résultat de référence.

Dans une deuxième modélisation, on traite le même problème en utilisant une méthode de condensation dynamique du bâtiment qui est alors représenté par un macro-élément dynamique de sous-structuration. Le sol est représenté directement par une impédance de sol déterminée au moyen du chaînage de *Code_Aster* avec le logiciel MISS3D et considérée également comme un macro-élément dynamique. La résolution du problème dynamique avec `DYNA_NON_LINE` s'opère sur un modèle mixte constitué des macro-éléments et d'un modèle physique réduit aux ressorts non linéaires de contact. Cette méthode plus exacte et plus économique que la précédente fournit toutefois des valeurs assez proches pour les déplacements maximaux obtenus en bord de fondation.

Dans une troisième modélisation, on utilise la même méthode de condensation que dans la deuxième modélisation mais la résolution du problème dynamique s'opère dans une boucle de calculs linéaires avec les opérateurs de dynamique transitoire où on recalcule à chaque fois sur toute la plage temporelle le complément de forces nodales dû à la non linéarité du décollement. Cette méthode est encore plus économique que la précédente et fournit des valeurs satisfaisantes pour les déplacements maximaux obtenus en bord de fondation.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Le logiciel *Code_Aster*-MISS3D utilise la méthode fréquentielle de couplage pour tenir compte de l'interaction sol-structure. Cette méthode, basée sur la sous-structuration dynamique, consiste à découper le domaine d'étude en trois sous-domaines :

- le sol,
- la fondation,
- le bâtiment.

La géométrie prise en compte est celle d'un bâtiment cylindrique creux sur sa fondation circulaire.

Géométrie de l'ensemble bâtiment - fondation

La géométrie est représentée sur la [Figure 1.1-a] ci-dessous :

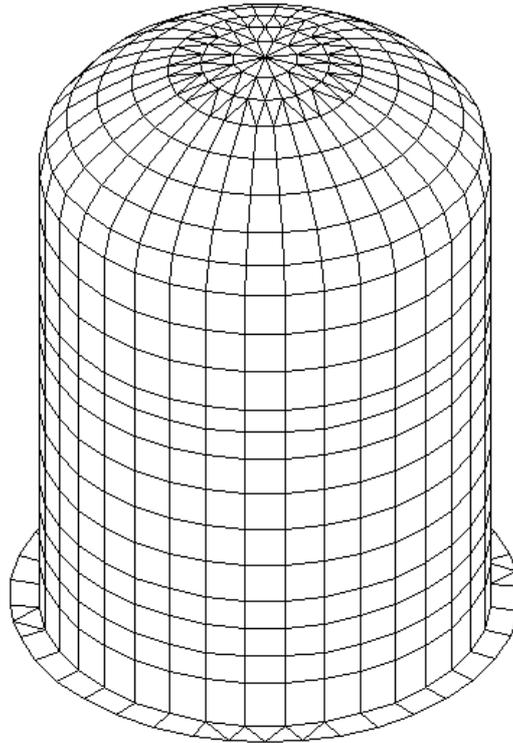


Figure 1.1-a : Géométrie de l'ensemble bâtiment - fondation

1.2 Propriétés des matériaux

On considère un sol homogène moyen de type *MC* dont les caractéristiques (respectivement module d'Young E , coefficient de Poisson ν , masse volumique ρ et amortissement hystérétique β) sont résumées dans le tableau ci-après :

Couche	Epaisseur (<i>m</i>)	ρ (<i>kg/m³</i>)	ν	E (<i>MPa</i>)	$\beta=2h$ (hyst.)
Couche 1	25	2100	0.4	2800	0.1

Tableau 1.2-1 : Caractéristiques mécaniques du sol homogène

La fondation et le bâtiment sont respectivement en bétons armé et précontraint dont les caractéristiques (module d'Young E , coefficient de Poisson ν , masse volumique ρ) sont résumées dans le tableau ci-après :

Matériau	E (<i>Pa</i>)	ρ (<i>kg/m³</i>)	ν
armé	4.0 E10	3000	0.31
précontraint	4.0 E10	2500	0.31

Tableau 1.2-2 : Caractéristiques mécaniques des bétons

1.3 Conditions aux limites et chargements mécaniques

La fondation est considérée comme souple sans liaison solide sur le groupe de mailles de la fondation. L'excitation sismique mono-appui de la structure est réalisée en appliquant 1 accélérogramme issu du spectre UNS-LB dans la direction horizontale X :

Direction	Accélérogramme	Norme
X	acc1.c2	0.35 g

Tableau 1.3-1 : Excitation sismique

On donne donc ici l'accélérogramme (normé à 0.15 g).

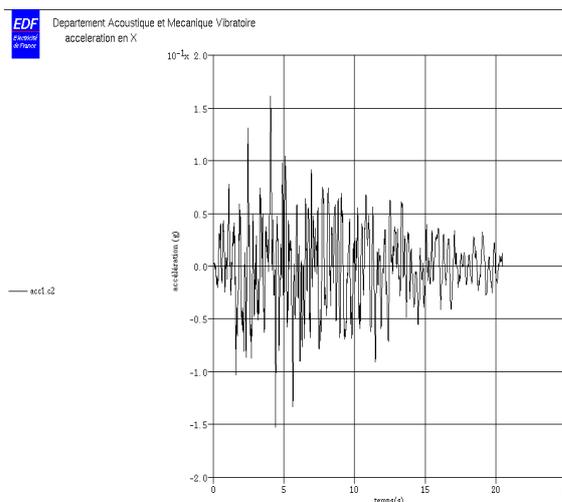


Figure 1.3-a : Accélérogramme acc1.c2

2 La méthode de calcul sur fondation souple

Représenter l'hypothèse de fondation souple revient à prendre en compte la condition limite de calcul des modes de fondation. On utilise la méthode suivante pour la modélisation A du cas test.

2.1 Description de la méthode

La condition de fondation souple est obtenue en représentant les modes statiques de fondation par des modes contraints associés à tous les degrés de liberté de translation de la fondation.

En conséquence, pour le calcul des modes propres sur base bloquée, on bloquera alors tous les degrés de liberté de translation ($DX = DY = DZ = 0$) du groupe de nœuds *BRADIER* [Figure 3.1-a] de la fondation dans la commande *AFFE_CHAR_MECA* [U4.44.01]. Pour le calcul des modes statiques de fondation, on obtiendra les modes contraints associés à chacun des degrés de liberté bloqués en ces nœuds. Le nombre de modes statiques à calculer s'élève alors au nombre de nœuds sur la fondation multiplié par 3, le nombre de degrés de liberté de translation associés.

Ensuite, une fois obtenu le calcul des impédances dépendant de la fréquence par l'option *FICHER* de la commande *CALC_MISS*, on peut alors affecter des caractéristiques globales recalées de la fondation au moyen de l'opérateur *AFFE_CARA_ELEM* [U4.42.01] option *RIGI_MISS_3D*.

2.2 Synthèse du calcul des impédances

Le calcul des impédances de sol nécessite de passer par les étapes suivantes d'enchaînement des commandes de *Code_Aster* :

- Calcul des modes propres sur base bloquée avec conditions limites de blocage compatibles avec l'hypothèse de fondation par la commande *CALC_MODES* [U4.52.02],
- Définition de l'interface dynamique, produisant le type (*CRAIGB* (préconisé) ou *MCNEAL*) 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] qui calcule les modes statiques de l'interface dynamique précédemment définie et complète la base des modes propres avec la base modale complète de type *CLASSIQUE*,
- 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 de *Code_Aster* vers *MISS3D* sont obtenues par l'utilisation d'une commande spécifique :
- La 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. Les termes du macro-élément dynamique servent à établir la contribution de la structure sur l'impédance.
- Ensuite on obtient le calcul des impédances de sol par le lancement de *MISS3D* par *CALC_MISS* [U7.03.12] option *FICHER*. En données de cette commande, outre le fichier produit par *IMPR_MACR_ELEM*, il est nécessaire de fournir un fichier de paramétrage de calcul ainsi qu'un fichier de données de sol tels que décrits dans le document [bib3].

3 Modélisation du décollement avec ressorts de sol

La modélisation simultanée du décollement et de l'ISS par des éléments discrets nécessite alors de combiner l'usage de ressorts linéaires représentant le sol et de ressorts non linéaires ne travaillant qu'en compression pour représenter le contact par pénalisation. Un exemple de modélisation adapté à la modélisation d'un bâtiment sous sollicitation sismique est décrit ci-après.

3.1 Couplage entre ressorts de sol et ressorts de contact

Dans le cas d'un bâtiment soumis à une excitation sismique dont on veut étudier l'interaction sol-structure (ISS), la base de la fondation doit être représentée géométriquement par des mailles surfaciques, groupées ici dans *SRADIER*, qui peuvent ne pas être modélisées en hypothèse de fondation souple quand elles s'appuient sur des éléments volumiques.

Dans le cas d'un comportement linéaire, on peut directement affecter aux nœuds de *SRADIER* des caractéristiques de rigidité calculées par l'option de *AFFE_CARA_ELEM*, *RIGI_MISS_3D*, pour l'hypothèse de fondation souple. Par contre, pour représenter le décollement, il faut que ces caractéristiques de sol ne soient actives qu'en cas de compression du sol et qu'elles s'annulent en cas de traction. Un moyen classique consiste à intercaler, entre chaque point de la fondation *SRADIER* et un ressort ponctuel affecté des caractéristiques de sol en ce point, un ressort en série non linéaire maillé par un segment supportant une modélisation *DIS_TR* en hypothèse de fondation rigide ou *DIS_T* en hypothèse de fondation souple. Ce groupe de segments discrets est appelé ici *LIGRAD*. Les caractéristiques de ces ressorts de contact sont très élevées en compression (10^{15} dans ce test) et nulles en traction. Elles sont renseignées avec un comportement matériau *DIS_CONTACT* puis affectées avec la loi de comportement *DIS_CHOC* dans un opérateur de calcul d'évolution. Les caractéristiques de la série de ressorts constituée par le segment ressort de contact et le ressort ponctuel de sol seront donc celles de ce dernier en compression (10^{15} dans ce test) et nulles en traction.

Pour calculer les caractéristiques de ressorts de sol ponctuels groupés ici dans *BRADIER*, il faut que les nœuds de ce groupe appartiennent à des mailles surfaciques de même géométrie que *SRADIER*. Or, *SRADIER* ne contient plus les nœuds de *BRADIER* car les segments de *LIGRAD* sont intercalés. Il faut donc créer dans le maillage un groupe de mailles surfaciques appelé ici *SRADIE2* en tradant *SRADIER* d'une valeur de distance très petite égale à la taille des segments de *LIGRAD* ($2.E-2$ dans ce test). Cette valeur de distance se retrouve ensuite comme jeu dans les caractéristiques de matériau *DIS_CONTACT* pour que le sol et la fondation soient jointifs au temps initial. Le groupe de mailles surfaciques *SRADIE2* n'a pas besoin d'être modélisé par des éléments finis.

L'ensemble des modélisations de ressorts de sol et de contact est schématisé ainsi [Figure 3.1-a] :

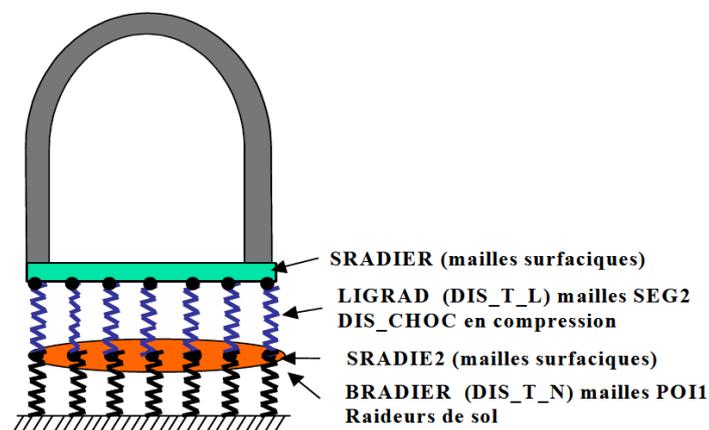


Figure 3.1-a : Modèle d'interface sol – structure couplant ressorts de contact et ressorts de sol

3.2 Calcul des modes sur tapis de ressorts de sol

Le calcul des modes sur tapis de ressorts de sol est souhaitable. Il est même nécessaire si on veut prendre en compte par la suite des amortissements modaux au cours du calcul dynamique.

Au préalable, il est nécessaire de calculer les caractéristiques de sol avec l'option de `AFFE_CARA_ELEM`, `RIGI_MISS_3D`, pour l'hypothèse de fondation souple. Ce sont ces nouvelles caractéristiques qui seront affectées à la place des précédentes et associées à la condition limite de blocage à la fois pour le calcul des modes sur tapis de ressorts de sol mais aussi dans les opérateurs de calcul d'évolution.

Pour `RIGI_MISS_3D`, on entre le groupe de mailles ponctuelles `BRADIER` sous `GROUP_MA_POIL`. Il suffit de renseigner le numéro d'unité logique de la matrice d'impédance de sol calculée par `MISS3D` qu'on a déjà donné dans `CALC_MISS` option `MISS_IMPE`.

3.3 Calcul dynamique du décollement

Avant de calculer l'évolution dynamique du décollement, il est nécessaire de calculer l'enfoncement statique dû à la pesanteur. On passe donc par les étapes suivantes de modélisation :

- Définition de la charge de pesanteur verticale et des charges de type « pesanteur » unitaires horizontales pour le chargement sismique,
- Définition de la liste des instants de calcul dynamique,
- Calcul de la position statique sous l'effet de la pesanteur par la commande `STAT_NON_LINE [U4.51.03]` : les segments discrets `LIGRAD` sont affectés par la relation de comportement `DIS_CHOC`. Le reste de la structure a un comportement linéaire dans notre cas mais l'intérêt de cette modélisation est aussi de pouvoir affecter d'autres relations de comportement,
- Calcul de l'évolution dynamique, avec reprise comme état initial du résultat statique précédent, sous l'effet de la pesanteur toujours et également des charges sismiques par la commande `DYNA_NON_LINE [U4.53.01]`. Les segments discrets `LIGRAD` sont aussi affectés par la relation de comportement `DIS_CHOC`. C'est à ce niveau qu'on peut introduire des amortissements modaux associés à chacun des modes sur tapis de ressorts de sol calculés précédemment.

4 Modélisation du décollement par condensation dynamique

Une seconde modélisation alternative active pour les modélisations B et C du cas test consiste à traiter le même problème en utilisant une méthode de condensation dynamique du bâtiment qui est alors représenté par un macro-élément dynamique de sous-structuration. On y condense le bâtiment par ses modes d'interface avec la fondation et les ressorts non linéaires de contact. Le sol est représenté directement par l'impédance de sol précédente considérée également comme un macro-élément dynamique au lieu de l'affectation de ressorts de sol par `AFFE_CARA_ELEM`, et option `RIGI_MISS_3D` ou `RIGI_PARASOL`. On retrouve les étapes précédentes à la différence près que la résolution du problème dynamique avec `DYNA_NON_LINE` s'opère sur un modèle mixte constitué des macro-éléments et d'un modèle physique réduit aux ressorts non linéaires de contact `LIGRAD` affectés par la relation de comportement `DIS_CHOC`. En outre, pour récupérer les champs sur la structure, il faut faire une restitution sur base physique par `REST_COND_TRAN` à partir de son macro-élément.

5 Solution de référence

5.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Cas test de non régression

5.2 Résultats de référence

On retient comme résultats de référence l'enfoncement initial sous l'effet du poids ainsi que les maxima relatifs de décollement correspondant aux déplacements verticaux relevés pendant le calcul dynamique aux 2 extrémités selon la direction X de la fondation.

On retient également comme résultat de référence le déplacement horizontal obtenu au sommet du bâtiment à l'instant final.

5.3 Références bibliographiques

- 1 V. GUYONVARH - G. DEVESA - N. GREFFET - D. CLOUTEAU : L'interaction sol-structure dans l'Industrie nucléaire. Note EDF R&D HT-62/03/028/A
- 2 D. CLOUTEAU : Manuel utilisateur de PROMISS3D - MISS2D, révision 6.3, par (LMSSM Ecole Centrale de Paris).
- 3 G. DEVESA - V. GUYONVARH : Interaction sol-structure en analyse sismique avec l'interface *Code_Aster* - PROMISS3D. Document Aster U2.06.07-A.

6 Modélisation A

6.1 Caractéristiques de la modélisation

6.1.1 Maillage de la fondation

La fondation est circulaire et modélisée par 242 éléments de coque DKT d'épaisseur 6,1 m .

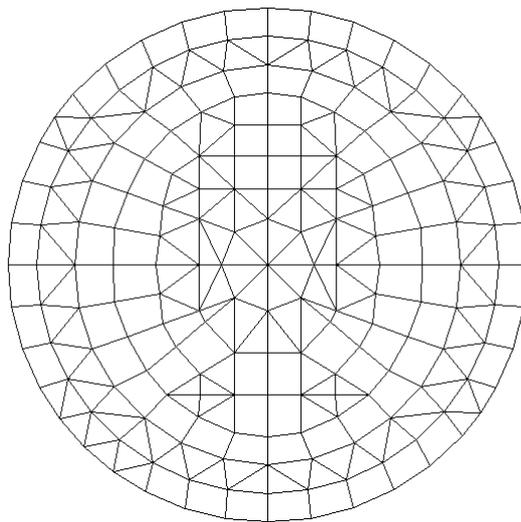


Figure 5.1-a : Maillage de la fondation du bâtiment

6.1.2 Maillage du bâtiment

Le bâtiment est constituée d'un fût circulaire surmonté d'un dôme et peut être modélisée par 756 éléments de coque DKT d'épaisseur 1,4 m .

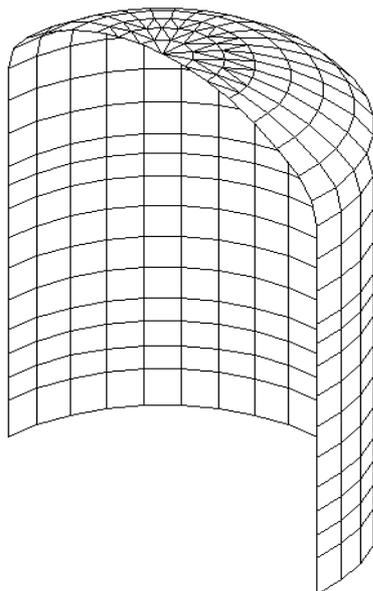


Figure 5.1-b : Demi-maillage du bâtiment en coupe verticale

6.2 Caractéristiques du maillage

Le modèle est composé de 1057 nœuds (5784 degrés de liberté), 1797 éléments (998 éléments plaques et 799 éléments discrets).

6.3 Paramètres du calcul

Le calcul dynamique est mené sur un intervalle de 0,4 secondes par pas de temps de 0,01 seconde avec un amortissement modal, calculé par `CALC_AMOR_MODAL`, différent pour chacun des modes dont la fréquence est inférieure à 20 Hz et comprenant une contribution d'amortissement matériel de 5 % pour la structure de bâtiment et une contribution représentative de l'amortissement radiatif du sol extraite de la partie imaginaire de l'impédance de sol.

6.4 Résultats de la modélisation A

Des tests de non-régressions sont faits sur les valeurs de déplacements (verticaux et horizontaux) des nœuds sommet et centre du radier, au début du transitoire et à la fin.

7 Modélisation B

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation met en œuvre la méthode de condensation dynamique de la structure et du sol. On utilise modèle mixte constitué de leurs macro-éléments et d'un modèle physique réduit aux ressorts non linéaires de contact. La modélisation s'appuie sur les mêmes éléments et le même maillage que la précédente à la différence des ressorts de sol de *BRADIER* remplacés par le macro-élément constitué directement de l'impédance de sol calculée par MISS3D.

7.2 Caractéristiques du maillage

Le modèle est composé de 1057 nœuds (5784 degrés de liberté), 1184 éléments (998 éléments plaques et 186 éléments discrets).

7.3 Paramètres du calcul

Le calcul dynamique est mené sur un intervalle de 3 secondes par pas de temps de 0.01 seconde avec un amortissement de 5 % pour chacun des modes de structure dont la fréquence est inférieure à 20 Hz combiné à une matrice d'amortissement extraite du macro-élément de sol et représentative de l'amortissement radiatif, ce qui équivaut à l'amortissement modal de la modélisation précédente.

7.4 Résultats de la modélisation B

Des tests de non-régressions sont faits sur les valeurs de déplacements (verticaux et horizontaux) des nœuds sommet et centre du radier, au début du transitoire et à la fin.

8 Modélisation C

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation utilise exactement le même modèle mixte constitué de macro-éléments et d'un modèle physique réduit aux ressorts non linéaires de contact que dans la deuxième modélisation. La différence réside seulement dans la méthode de résolution dans une boucle de calculs linéaires avec les opérateurs de calcul transitoire où on recalcule chaque fois le complément de forces nodales dû à la non linéarité du décollement au moyen de l'opérateur `CALC_FORC_NONL`. On procède ici à 6 itérations de calculs linéaires.

8.2 Caractéristiques du maillage

Le modèle est composé de 1057 nœuds (5784 degrés de liberté), 1184 éléments (998 éléments plaques et 186 éléments discrets).

8.3 Paramètres du calcul

Le calcul dynamique est mené sur un intervalle de 5 secondes par pas de temps de 0.01 seconde avec un amortissement de 5 % pour chacun des modes de structure dont la fréquence est inférieure à 20 Hz combiné à une matrice d'amortissement extraite du macro-élément de sol et représentative de l'amortissement radiatif, ce qui équivaut à l'amortissement modal de la première modélisation.

8.4 Résultats de la modélisation C

Des tests de non-régressions sont faits sur les valeurs de déplacements (verticaux et horizontaux) des nœuds sommet et centre du radier, au début du transitoire et à la fin.

9 Synthèse des résultats

La méthode de représentation de l'ISS par un tapis de ressorts de sol utilisée dans la modélisation A fournit des résultats de non régression en terme de déplacements maximaux obtenus en bord de fondation à l'instant initial et lors d'un décollement.

Une méthode alternative de représentation de l'ISS et de la structure par condensation dynamique est utilisée dans la modélisation B. Cette méthode plus exacte (car utilisant tous les termes de l'impédance de sol) et plus économique (à cause de la condensation dynamique) que la précédente fournit toutefois des valeurs assez proches pour les déplacements maximaux obtenus en bord de fondation.

C'est donc elle que l'on utilisera en priorité lors des études dynamiques de décollement.

Elle est également utilisée dans la modélisation C dans laquelle la résolution du problème dynamique s'opère dans une boucle de calculs linéaires avec les opérateurs de calcul transitoire où on recalcule à chaque fois sur toute la plage temporelle le complément de forces nodales dû à la non linéarité du décollement. Cette méthode de résolution est encore plus économique que la précédente et fournit des valeurs satisfaisantes pour les déplacements maximaux obtenus en bord de fondation