

FDLV112 - Calcul de barrage avec retenue sous sollicitation sismique

Résumé :

Le but de ce cas test avec la modélisation A est de valider les fonctionnalités de calcul couplé fluide-structure de barrage avec retenue sous sollicitation sismique en prenant en compte l'hypothèse d'incompressibilité, donc de masse ajoutée pour la retenue ainsi que celle de forces ajoutées pour modéliser le mouvement d'entraînement de cette retenue dû à l'excitation sismique. Avec la modélisation A, le calcul est linéaire, transitoire sur base modale. On se propose également, avec cette modélisation, de valider le calcul de la matrice fonction de transfert et de signaux reconstitués avec la macro-commande `CALC_TRANSFERT` [U4.53.51]. Afin d'accélérer ce test on ne va tenir compte que des quatre premières secondes des signaux sismiques (cet intervalle contient l'essentiel de la phase forte du séisme).

La modélisation B contribue à la validation du chaînage *Code_Aster* - MISS3D par la méthode fréquentielle de couplage en interaction sol-fluide-structure (ISFS). On y teste simplement la lecture des impédances de sol et des forces sismiques calculées par MISS en ISFS, afin de pouvoir procéder à une réponse sismique par calcul harmonique dans *Code_Aster* en ISFS. En prenant en compte dans le couplage une partie de domaine de sol, on procède à une analyse modale préalable puis à une analyse harmonique. Les résultats modaux correspondent aux modes propres du barrage avec masse d'eau ajoutée obtenus avec la modélisation A et les résultats de réponses sismiques constituent un cas de non régression.

La modélisation C contribue à la validation de la fonctionnalité de modélisation de la masse ajoutée de fluide par affectation de masses ponctuelles aux nœuds de l'interface fluide-structure au moyen de l'option `MASS_AJOU` de l'opérateur `AFFE_CARA_ELEM`. Cette modélisation ne nécessite que de prendre en compte la structure de barrage et pas la retenue d'eau, ni le sol. Les résultats modaux correspondent aux modes propres d'un barrage avec masse d'eau ajoutée obtenus avec la modélisation A.

La modélisation D reprend la modélisation B avec le chaînage *Code_Aster* - MISS3D et fait intervenir les fonctionnalités de résolution avec prise en compte ou non de la variabilité spatiale du champ sismique incident par l'opérateur `DYNA_ISS_VARI` avec le mot clé `ISSF`. Sans variabilité, on constate des résultats de réponses sismiques proches de ceux de la modélisation A.

La modélisation E reprend la modélisation B avec le chaînage *Code_Aster* - MISS3D afin de tester l'utilisation des points de contrôle dans le sol en ISFS. On teste en particulier l'évolution fréquentielle de l'accélération en des points situés sous la base de la fondation du barrage.

Les modélisations F et G reprennent la modélisation B et les calculs sismiques des modélisations A et D avec la méthode Laplace-temps pour des résultats proches.

La modélisation H permet de prendre en compte par des éléments finis (modélisation « full-FEM ») tous les domaines en ISFS : structure, fluide et sol par éléments 3D, frontière extérieure du sol et fond de retenue par éléments absorbants 2D. On teste des résultats de réponses sismiques proches de ceux des modélisations A et D sans variabilité.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

La géométrie complète est constituée du barrage-voûte, de la retenue nécessaires et suffisants à la modélisation A ainsi que de différentes interfaces 2D nécessaires également à la modélisation B [Figure 1.1-a].

On a 4 types d'interface possibles nécessaires à la modélisation B par le chaînage *CodeAster* - *MISS3D* [bib1] avec la méthode fréquentielle de couplage en interaction sol-fluide-structure (ISFS):

- l'interface sol-structure,
- l'interface sol-fluide,
- l'interface fluide-structure,
- l'interface sol-libre.

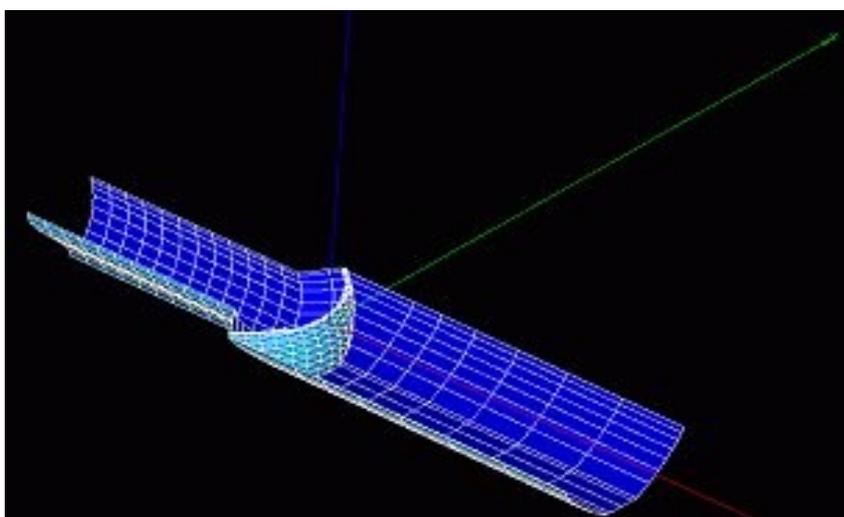


Figure 1.1-a : modèle complet du barrage et de sa retenue avec ses interfaces

1.2 Propriétés des matériaux

La structure

Les caractéristiques mécaniques utilisées pour la structure en béton sont indiquées dans le tableau 1.2-a. :

| | |
|--------|------------------------|
| E | 36000 MPa |
| ν | 0.2 |
| ρ | 2400 Kg/m ³ |

Tableau 1.2-a : caractéristiques de la structure

Le sol

Les caractéristiques mécaniques du sol utilisées uniquement pour la modélisation B sont celles indiquées dans le tableau 1.2-b. Elles correspondent à un sol très dur pour se rapprocher du test FDLV112A.

| | |
|------|-------------------------|
| E | 300000 MPa |
| NU | 0.16 |
| RHO | 2000. kg/m ³ |
| BETA | 0.1 |

Tableau 1.2-b : caractéristiques du sol

Le fluide

| | |
|----------|-------------------------|
| Célérité | 1500 m/s |
| RHO | 1000. kg/m ³ |
| BETA | 0. |

Tableau 1.2-c: caractéristiques du fluide

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Les données de ce test sont tirées d'une étude générale mettant en œuvre les fonctionnalités de *Code_Aster* pour traiter les problèmes d'analyse sismique des barrages en béton [bib2]. Pour la modélisation A, les résultats obtenus ont été confrontés avec ceux obtenus avec le logiciel EACD dédié à ce genre de calcul. Toutefois, il n'y a pas eu de relevés précis de valeur avec ce logiciel. C'est pourquoi on s'oriente vers une solution numérique et des résultats de non régression obtenus exclusivement avec *Code_Aster*. Pour la modélisation B, les résultats obtenus en analyse modale sur les premières fréquences sont comparés aux pics de résonance de la modélisation A. La nature différente des résultats fait qu'on s'oriente également vers une solution numérique et des résultats de non régression obtenus exclusivement avec *Code_Aster*.

Pour la modélisation A et dans le cadre de la validation de la reconstitution de signaux, la solution de référence correspond à la réponse dynamique de la structure.

2.2 Résultats de référence

On teste l'accélération maximale suivant les 3 directions et le spectre de réponse d'oscillateur correspondant pour un amortissement de 5 % au nœud milieu du bord supérieur du barrage. On regarde également les premiers pics de résonance ou fréquences propres dus système couplé.

Pour la validation de la reconstitution de signaux, on réalise préalablement trois calculs avec un chargement unidirectionnel suivant les directions x, y ou z. On teste ensuite les parties réelle et imaginaire obtenues pour la fréquence 1.08520E+01.

2.3 Incertitude sur la solution

Solution numérique.

2.4 Références bibliographiques

- 1) D. CLOUTEAU : « Manuel de référence de MISS3D – version 6.3 – Centrale Recherche SA »
- 2) E CHAMPAIN : "Analyse sismique des barrages en béton avec le *Code_Aster*" - NT HT-62/01/023/B
- 3) I. ZENTNER : « Interaction sol-structure en analyse sismique avec variabilité spatiale » document *Code_Aster* U2.06.12

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation A concerne les fluides incompressibles avec masses ajoutées. On ne modélise donc que le barrage et pas la retenue d'eau. Cette dernière n'est prise en compte que dans la macro-commande `MACRO_MATR_AJOU`.

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage comprend 80 mailles de type PENTA15 et 696 mailles de type HEXA20.
Le barrage est modélisé en 3D.

3.3 Conditions aux limites et chargements mécaniques

On bloque le nœud *NI30* à la base du barrage et on impose au groupe de nœuds *BARFOND* qui constitue le fond du barrage en contact avec la fondation, un déplacement uniforme dans toutes les directions. Le nœud *NI30* solidaire de tout le groupe *BARFOND* est soumis à une excitation sismique dans les 3 directions de l'espace. Les 3 accélérogrammes sont représentés sur les figures [Figure 1.3-a], [Figure 1.3-b], [Figure 1.3-c] ci-dessous.

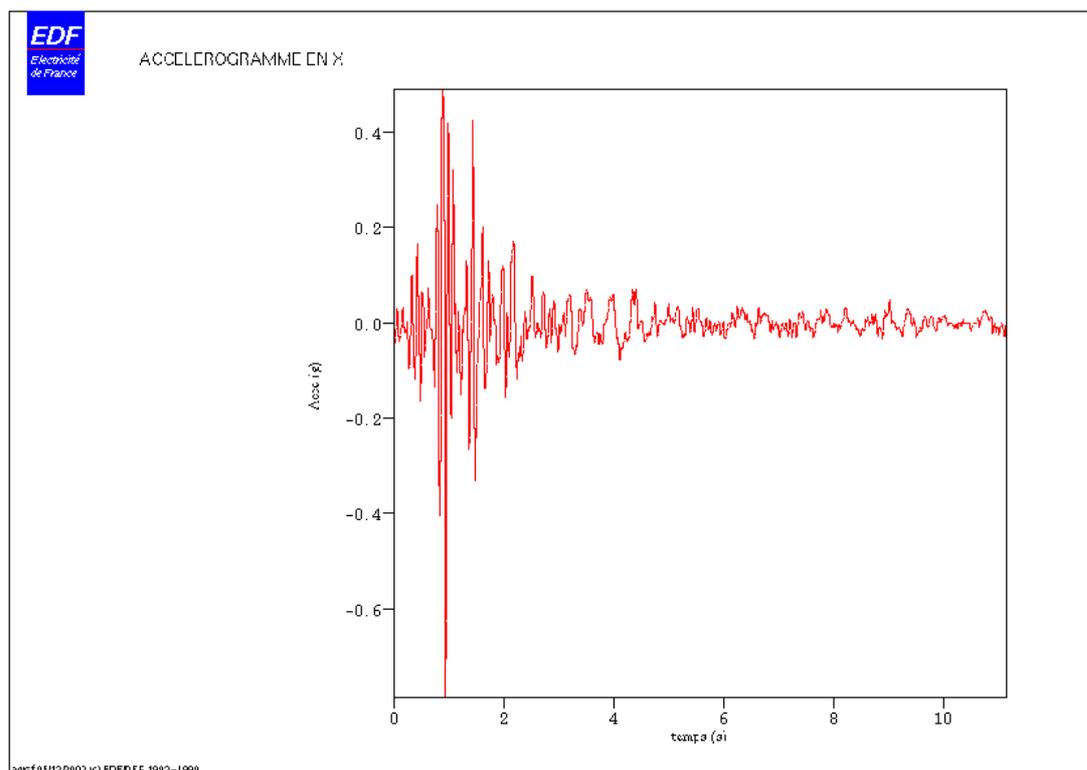


Figure 1.3-a : Accélération en X

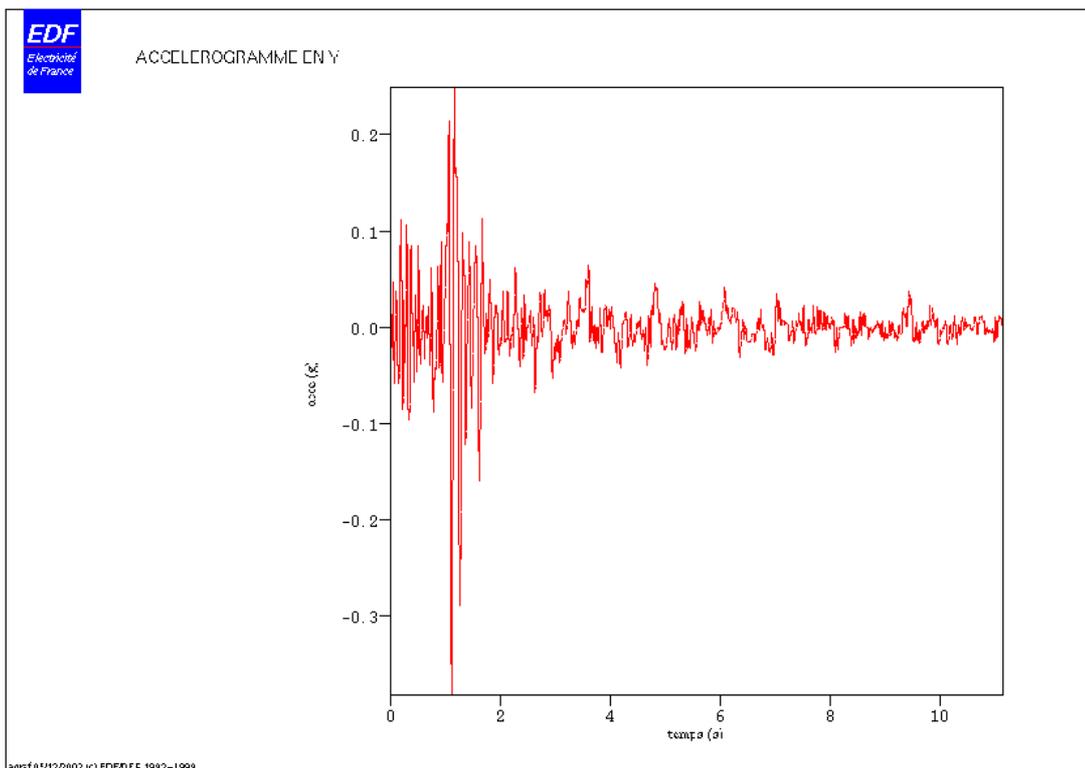


Figure 1.3-b : Accélération en Y

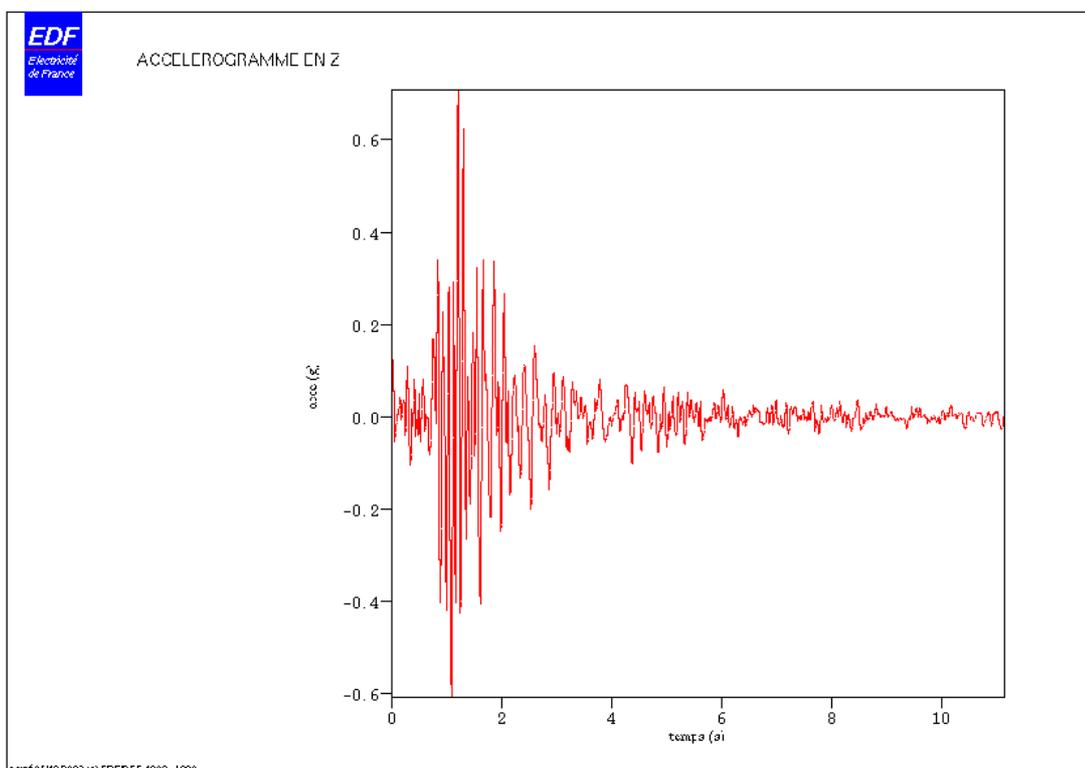


Figure 1.3-c : Accélération en Z

3.4 Grandeurs testées

On teste en m/s^2 l'accélération maximale suivant les 3 directions et le spectre de réponse d'oscillateur correspondant (*SRO*) pour un amortissement de 5 % au nœud *NI909* , milieu du bord supérieur du barrage.

Pour la validation de `CALC_TRANSFERT` [U4.53.51] on compare la valeur de la réponse harmonique à la fréquence 1.09720E+01 au nœud *NI996* .

4 Résultats de la modélisation A

4.1 Valeurs testées

Valeurs testées pour valider les fonctionnalités de calcul couplé fluide-structure de barrage :

| Identification | Référence(m/s^2) |
|----------------------|----------------------|
| ACCEX ($t=1.0 s$) | 5.858849 |
| SROX ($f=9.0 Hz$) | 17.57892 |
| ACCEY ($t=1.0 s$) | 2.807564 |
| SROY ($f=9.0 Hz$) | 9.749478 |
| ACCEZ ($t=1.02 s$) | -0.77467029 |
| SROZ ($f=17.4 Hz$) | 3.805157 |

Valeur testée pour la validation de `CALC_TRANSFERT` :

| Identification | Référence(m/s^2) |
|------------------------------|----------------------|
| ACCEX ($f=1.09726E+01 Hz$) | 6,26352+8,87646j |

4.2 Synthèse des résultats

Les résultats obtenus ont été confrontés avec ceux obtenus avec le logiciel EACD dédié à ce genre de calcul. Bien qu'il n'y ait pas eu de relevés précis de valeur avec ce logiciel, l'étude [bib2] a conclu à une bonne concordance avec *Code_Aster*. Toutefois, on se réfère dans ce test à des résultats de non régression obtenus exclusivement avec *Code_Aster*.

Pour la validation de `CALC_TRANSFERT` on teste le fonctionnement en harmonique, en temporel, pour un traitement en repère relatif ou absolu. On obtient une très bonne concordance des résultats avec une tolérance très faible de l'ordre de la précision machine.

5 Modélisation B

5.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation B contribue à la validation du chaînage *Code_Aster* - MISS3D par la méthode fréquentielle de couplage en interaction sol-fluide-structure (ISFS).

Le logiciel ProMISS3D [bib1] utilise la méthode fréquentielle de couplage pour tenir compte de l'interaction sol-fluide-structure. Cette méthode, basée sur la sous-structuration dynamique, consiste à découper le domaine d'étude en trois sous-domaines :

- le sol,
- le fluide,
- la structure.

Il en résulte 4 types d'interface possibles :

- l'interface sol-structure,
- l'interface sol-fluide,
- l'interface fluide-structure,
- l'interface sol-libre.

La modélisation B par *Code_Aster* ne nécessite que de prendre en compte la structure de barrage et pas la retenue d'eau, ni le sol. Il suffit de définir leurs différentes interfaces en 2D.

5.2 Caractéristiques du maillage

L'utilisation du chaînage *Code_Aster* - ProMISS3D ne nécessite de mailler que :

- le barrage voûte en 3D,
- les différentes interfaces en 2D que sont : le sol en surface, la surface de sol en contact avec le fond de la retenue, la fondation du barrage en contact avec le sol, la surface du barrage en contact avec la retenue.

Le maillage fourni à *Code_Aster* comprend au total 1745 nœuds et les éléments suivants :

- Le maillage volumique de la structure de barrage de 625 éléments tétraèdres TETRA10 dans le groupe *STRVOU*,
- Le maillage de l'interface sol-structure comprenant 80 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *ISOLSTR*. Ce groupe de mailles doit être orienté avec sa normale dirigée vers le sol,
- Le maillage de l'interface fluide-structure comprenant 142 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *IFLUSTR*. Ce groupe de mailles doit être orienté avec sa normale dirigée vers la retenue,
- Le maillage de l'interface fluide-sol comprenant 126 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *IFLUSOL*. Ce groupe de mailles doit être orienté avec sa normale dirigée vers la retenue,
- Le maillage du sol libre comprenant 280 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *SLIBREM*.

5.3 Conditions aux limites et chargements mécaniques

On excite la structure dans la direction horizontale X avec un chargement d'accélération imposée à la surface du sol en champ lointain harmonique $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ de module unitaire pour différentes pulsations. Cela revient dans *Code_Aster* à imposer ce chargement au moyen du mot clé `EXCIT_SOL` dans `IMPR_MISS_3D`.

On calcule les modes propres sur base bloquée en considérant une condition limite d'encastrement à l'interface sol – structure en bloquant le nœud *N316* à la base du barrage et en imposant au groupe de nœuds *ISOLSTR2* qui constitue le fond du barrage en contact avec la fondation, une condition de liaison solide.

Ensuite, on calcule les modes statiques de type contraint à partir de cette condition limite d'encastrement en imposant successivement un déplacement unitaire en chacun des 6 degrés de liberté du nœud *N316* de cette interface.

5.4 Grandeurs testées et résultats

On procède au calcul des premières fréquences propres en intégrant l'impédance de sol et de fluide avec celle du domaine de structure.

On teste en m/s^2 l'accélération dans la direction X obtenue pour 2 fréquences au nœud $N253$, milieu du bord supérieur du barrage.

On retrouve les 5 premières fréquences propres d'un barrage avec masse d'eau ajoutée obtenus avec la modélisation A autour de respectivement : $3.5 Hz$, $3.6 Hz$, $4.9 Hz$, $6.2 Hz$, $7.5 Hz$.

5.5 Synthèse des résultats

Les résultats modaux correspondent aux modes propres d'un barrage avec masse d'eau ajoutée obtenus avec la modélisation A et les résultats de réponses sismiques constituent un cas de non régression.

6 Modélisation C

6.1 Caractéristiques de la modélisation et du maillage

La modélisation C contribue à la validation de la fonctionnalité de modélisation de la masse ajoutée de fluide par affectation de masses ponctuelles aux nœuds de l'interface fluide-structure au moyen de l'option `MASS_AJOU` de l'opérateur `AFFE_CARA_ELEM`.

La modélisation C par *Code_Aster* ne nécessite que de prendre en compte la structure de barrage et pas la retenue d'eau, ni le sol. Il suffit de définir les interfaces sol-structure et fluide-structure.

Le maillage fourni à *Code_Aster* est exactement le même que celui de de la modélisation B mais on ne prend en compte dans la modélisation que les parties suivantes :

- Le barrage voûte en 3D, qui s'appuie sur le maillage volumique de la structure de barrage de 625 éléments tétraèdres `TETRA10` dans le groupe `STRVOU`,
- L'interface sol-structure dont le maillage comprend 80 éléments surfaciques `QUAD8` et `TRIA6` dans le groupe `ISOLSTR`,
- L'interface fluide-structure dont le maillage comprend 142 éléments surfaciques `QUAD8` et `TRIA6` dans le groupe `IFLUSR`.

6.2 Conditions aux limites et chargements mécaniques

On calcule les modes propres sur base bloquée en considérant une condition limite d'encastrement à l'interface sol-structure en bloquant le groupe de nœuds `ISOLSTR2` qui constitue le fond du barrage en contact avec la fondation. On affecte ensuite des caractéristiques de masse ponctuelle sur l'interface fluide-structure constituée par le groupe `IFLUSR` au moyen de l'option `MASS_AJOU` de l'opérateur `AFFE_CARA_ELEM`.

6.3 Grandeurs testées et résultats

On procède au calcul des premières fréquences propres.

On retrouve les 4 premières fréquences propres d'un barrage obtenus avec les modélisations A et B autour de respectivement : 3.5 Hz , 3.6 Hz , 4.9 Hz , 6.1 Hz .

6.4 Synthèse des résultats

Les résultats modaux correspondent aux modes propres d'un barrage avec masse d'eau ajoutée obtenus avec la modélisation A et confirmés par la modélisation B avec chaînage *Code_Aster* - `MISS3D` par la méthode fréquentielle de couplage.

7 Modélisation D

7.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation D, comme la modélisation B, contribue à la validation du chaînage *Code_Aster* - MISS3D par la méthode fréquentielle de couplage en interaction sol-fluide-structure (ISFS).

De plus, elle fait également intervenir les fonctionnalités de résolution avec prise en compte de la variabilité spatiale du champ sismique incident par l'opérateur *DYNA_ISS_VARI* [bib3] avec le mot clé *ISSF*.

La modélisation D, comme la modélisation B, ne nécessite que de prendre en compte la structure de barrage et pas la retenue d'eau, ni le sol. Il suffit de définir leurs différentes interfaces en 2D.

7.2 Caractéristiques du maillage

L'utilisation du chaînage *Code_Aster* - ProMISS3D ne nécessite de mailler que :

- le barrage voûte en 3D,
- les différentes interfaces en 2D que sont : le sol en surface, la surface de sol en contact avec le fond de la retenue, la fondation du barrage en contact avec le sol, la surface du barrage en contact avec la retenue.

Le maillage fourni à *Code_Aster* comprend au total 1745 nœuds et les éléments suivants :

- Le maillage volumique de la structure de barrage de 625 éléments tétraèdres TETRA10 dans le groupe *STRVOU*,
- Le maillage de l'interface sol-structure comprenant 80 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *ISOLSTR*. Ce groupe de mailles doit être orienté avec sa normale dirigée vers le sol,
- Le maillage de l'interface fluide-structure comprenant 142 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *IFLUSTR*. Ce groupe de mailles doit être orienté avec sa normale dirigée vers la retenue,
- Le maillage de l'interface fluide-sol comprenant 126 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *IFLUSOL*. Ce groupe de mailles doit être orienté avec sa normale dirigée vers la retenue,
- Le maillage du sol libre comprenant 280 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *SLIBREM*.

7.3 Conditions aux limites et chargements mécaniques

On excite la structure dans la direction horizontale X avec un chargement d'accélération imposée à la surface du sol en champ lointain.

Le nœud *N316* solidaire de tout le groupe *ISOLSTR2* est donc soumis à l'excitation sismique sous forme d'accélération imposée. L' accélérogramme est le même que celui utilisé dans la modélisation A et est représenté sur la figure [Figure 1.3-a].

On calcule les modes propres sur base bloquée en considérant une condition limite d'encastrement à l'interface sol – structure en bloquant le nœud *N316* à la base du barrage et en imposant au groupe de nœuds *ISOLSTR2* qui constitue le fond du barrage en contact avec la fondation, une condition de liaison solide.

Ensuite, on calcule les modes statiques de type contraint à partir de cette condition limite d'encastrement en imposant successivement un déplacement unitaire en chacun des 6 degrés de liberté du nœud *N316* de cette interface.

7.4 Grandeurs testées et résultats

On procède à 2 résolutions avec l'opérateur *DYNA_ISS_VARI*, l'une avec un paramètre de variabilité spatiale *PARA_ALPHA=0* équivalent à une réponse sans prise en compte de la variabilité spatiale et l'autre avec un paramètre de variabilité spatiale *PARA_ALPHA=0.5*.

Pour ces 2 résultats, on teste en m/s^2 l'accélération maximale dans la direction X obtenue au nœud $N253$, milieu du bord supérieur du barrage, à la fois sur l'accélérogramme temporel ainsi que sur le spectre de réponse d'oscillateur correspondant (SRO) pour un amortissement de 5 %.

Pour le calcul sans variabilité spatiale, on retrouve des résultats proches de ceux de la modélisation A. Les résultats de l'accélération maximale dans la direction X obtenue au nœud $N253$ avec ou sans variabilité spatiale sont synthétisés sur le tableau ci-dessous :

| Sans Variabilité | Accélération (m/s^2) |
|-------------------------|--|
| ACCEX ($t=1.0 s$) | 4,88 |
| SROX ($f=10.7 Hz$) | 17.40 |
| Avec Variabilité | Accélération (m/s^2) |
| ACCEX ($t=1.0 s$) | 3,75 |
| SROX ($f=10,7 Hz$) | 13.72 |

On procède également à 2 résolutions spectrales avec l'opérateur `DYNA_ISS_VARI`, l'une avec un paramètre de variabilité spatiale `PARA_ALPHA=0` équivalent à une réponse sans prise en compte de la variabilité spatiale et l'autre avec un paramètre de variabilité spatiale `PARA_ALPHA=0.5`.

Pour ces 2 résultats, on teste la densité spectrale de réponse (DSP) dans la direction X obtenue au nœud $N253$, milieu du bord supérieur du barrage.

On retrouve le même rapport (0,77), élevé ici au carré, que l'on avait entre les réponses de spectre de réponse d'oscillateur (SRO), avec celui obtenu entre les réponses de densité spectrale de réponse (DSP) des calculs avec ou sans variabilité spatiale à la fréquence $f=10,7 Hz$ qui sont synthétisées sur le tableau ci-dessous :

| Sans Variabilité | Accélération |
|-------------------------|---------------------|
| DSPX ($f=10.7 Hz$) | 43.3 |
| Avec Variabilité | Accélération |
| DSPX ($f=10,7 Hz$) | 25.79 |

7.5 Synthèse des résultats

Les résultats de réponses sismiques constituent un cas de non régression mais on peut dire que ceux obtenus sans variabilité spatiale sismique correspondent à ceux d'un barrage avec masse d'eau ajoutée obtenus avec la modélisation A. Les résultats de réponses sismiques avec variabilité spatiale présentent par rapport au cas sans variabilité un gain d'un ordre de grandeur attendu d'environ 25%.

8 Modélisation E

8.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation D est identique à la modélisation B.
Il s'agit seulement de tester la réponse sismique à une accélération unitaire en des points de contrôle situés sans le sol et définis par des discrets ponctuels de type `DIS_T`.

8.2 Caractéristiques du maillage

Elles sont également identiques à celles de la modélisation B. On y ajoute seulement 3 discrets ponctuels situés respectivement aux cotes -72 m (base de la fondation), -80 m et -100 m mais à une distance de 200 m du centre de la fondation.

8.3 Conditions aux limites et chargements mécaniques

On procède exactement de la même manière qu'avec la modélisation B. On définit en outre le groupe de mailles des points de contrôle qu'on renseigne dans le mot clé `GROUP_MA_CONTROL` de l'opérateur `CALC_MISS`.

On excite la structure dans la direction horizontale Z avec un chargement d'accélération imposée unitaire harmonique, ou bien transitoire sinusoïdale unitaire pendant une période de $0,2\text{ s}$ avec une fréquence 5.0 Hz , à la surface du sol en champ lointain.

Il est nécessaire par rapport à la modélisation B, d'ajouter dans la description du sol par `DEFI_SOL_MISS` 2 couches aux cotes des 2 points de contrôle sous la fondation, où on positionne à la fois une source et un récepteur.

8.4 Grandeurs testées et résultats

On procède à un appel de l'opérateur `CALC_MISS`, avec l'option `TYPE_RESU=TABLE_CONTROL`.
Les grandeurs testées sont essentiellement les réponses harmoniques en chaque point de contrôle à la fréquence 5.0 Hz qui représentent des valeurs de non-régression. Les résultats sont résumés sur le tableau ci-dessous :

| Point de contrôle | Accélération (m/s^2) |
|-------------------|--------------------------|
| P1 | 9.84140E-01+4.96964E-03j |
| P2 | 9.61780E-01+2,61026E-02j |
| P3 | 9.51352E-01+2,63920E-02j |

8.5 Synthèse des résultats

Ces valeurs sont identiques en module à celles obtenues pour l'instant $0,05\text{ s}$ quart de période respectivement comme réponses transitoires à l'accélération transitoire sinusoïdale unitaire imposée avec une fréquence 5.0 Hz .

9 Modélisation F

9.1 Caractéristiques de la modélisation et du maillage

On utilise pour cette modélisation exactement le même maillage et le même modèle au départ que ceux de la modélisation B, avec le chaînage *Code_Aster* - MISS3D par la méthode fréquentielle de couplage en interaction sol-fluide-structure (ISFS).

Dans le modèle, on ajoute un super-élément comprenant un macro-élément obtenu à partir de l'évolution temporelle de l'impédance des domaines de sol et fluide réunis obtenue à l'aide de la chaîne *Code_Aster* - MISS3D par l'option `TYPE_RESU='FICHIER_TEMPS'` de `CALC_MISS` avec l'option `'ISFS='OUI'`, puis intégrée par une méthode de Laplace-temps. Ce macro-élément représente le comportement des domaines de sol et fluide réunis décomposé sur une base de 60 modes représentatifs de la souplesse de la fondation à l'interface sol-structure.

Pour optimiser le temps de calcul des impédances temporelles, on a introduit dans `CALC_MISS` pour l'option `TYPE_RESU='FICHIER_TEMPS'` les paramètres d'interpolation : `PCENT_FREQ_CALCUL=0` et `FACTEUR_INTERPOL=7`.

9.2 Conditions aux limites et chargements mécaniques

La liaison entre le modèle de sol et fluide réunis et la structure est définie par une charge de liaison de type `LIAISON_INTERF` assurant une relation entre les coordonnées modales des 30 modes d'interface et les degrés de liberté physiques des interfaces sol-structure et fluide-structure réunies dans un même groupe de nœuds *NISFS*.

La réponse à la sollicitation sismique est obtenue par un calcul dynamique transitoire au moyen de l'opérateur `DYNA_NON_LINE`. La charge de force interne de sol est introduite par une seule occurrence du mot clé `EXCIT` avec le mot clé `FORCE_SOL` dans une résolution dynamique en repère absolu.

La charge sismique est calculée sous forme de charge mécanique par `CALC_MISS` avec l'option `TYPE_RESU='CHARGE'` à partir de l'intégration temporelle des forces sismiques contenues dans le fichier dont l'unité logique est spécifiée par le mot-clé `UNITE_RESU_FORC`. Elle est combinée à la double intégration temporelle de l'accélération sous forme de déplacement imposé derrière le mot clé `FONC_SIGNAL`. Le lieu d'interface sol-fluide-structure est défini explicitement au moyen du mot clé `NOEUD_AFFE` : il est constitué de la donnée de 5 nœuds fictifs jouant le rôle de 30 coordonnées modales. Il y a une charge sismique correspondant à la composante suivant X . Cette charge sismique est également introduite comme une occurrence du mot clé `EXCIT` de l'opérateur `DYNA_NON_LINE`. On utilise pour cette charge la prise en compte de la variabilité avec les mêmes paramètres que dans la modélisation D. L'accélération imposée à la surface du sol en champ lointain est celle définie sur la [Figure 1.3-a].

La taille de la fenêtre de calcul est de $1,3s$ par pas de $0,01s$ suffisante pour capter les pics de réponse transitoire et de SRO en accélération dans la direction X au nœud *N253*, milieu du bord supérieur du barrage. On utilise le schéma numérique HHT avec le paramètre $\alpha = -0,05$ et les 2 options : `MODI_EQUI='NON'` jusqu'à $0,15s$ et `MODI_EQUI='OUI'` au-delà.

9.3 Grandeurs testées et résultats

On teste en m/s^2 l'accélération maximale dans la direction X obtenue au nœud *N253*, milieu du bord supérieur du barrage, à la fois sur l'accélérogramme temporel ainsi que sur le spectre de réponse d'oscillateur correspondant (*SRO*) pour un amortissement de 5 %.

Les résultats de l'accélération maximale sont synthétisés sur le tableau ci-dessous :

| Calcul Laplace-temps | Accélération (m/s^2) |
|----------------------|--------------------------|
| ACCEX ($t=1.0s$) | 3,47 |
| SROX ($f=10.7Hz$) | 12.19 |

9.4 Synthèse des résultats

On retrouve alors des résultats proches de ceux de la modélisation D avec variabilité spatiale qui constituent la référence `AUTRE_ASTER`.

10 Modélisation G

10.1 Caractéristiques du maillage

On utilise pour cette modélisation presque le même maillage que celui de la modélisation F, en effet, seulement les nœuds NO* ainsi que les mailles correspondantes ont été effacés. Ces nœuds correspondent aux mailles fictives nécessaires pour faire de la réduction dynamique dans des analyses non-linéaires. En particulier, on s'intéresse dans cette modélisation aux calculs d'interaction sol-fluide-structure (ISFS) réalisés avec le chaînage Code_Aster-MISS3D.

10.2 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation reproduit celle de la modélisation F au moyen de la macro-commande PRE_SEISME_NONL. Ainsi, cette macro-commande est testée dans la phase du calcul de la base modale d'ISFS (option PRE_CALC_MISS) et dans la phase de la réduction dynamique à l'aide des macro-éléments (option POST_CALC_MISS).

Pour chaque phase, les caractéristiques du modèle à construire sont à définir :

- Première étape : on définit un modèle de barrage qui servira au calcul des modes, c'est-à-dire un modèle reposant sur un tapis de ressorts de sol pour le calcul des modes entraînés par la retenue (le fluide) et sur un élément discret pour le calcul des modes de corps rigide de la fondation.
- Deuxième étape : on définit le modèle de barrage sur lequel on souhaite évaluer directement la réponse non-linéaire.

10.3 Grandeurs testées et résultats

On teste en m/s^2 l'accélération maximale dans la direction X obtenue au nœud $N253$, milieu du bord supérieur du barrage, à la fois sur l'accélérogramme temporel ainsi que sur le spectre de réponse d'oscillateur correspondant (SRO) pour un amortissement de 5 %.

Les résultats de l'accélération maximale sont synthétisés sur le tableau ci-dessous :

| Calcul Laplace-temps | Accélération (m/s^2) |
|----------------------|--------------------------|
| ACCEX ($t=1.0s$) | 4,68 |
| SROX ($f=10.7Hz$) | 14,93 |

10.4 Synthèse des résultats

On retrouve alors des résultats proches de ceux des modélisation A et D sans variabilité spatiale qui constituent la référence AUTRE_ASTER.

11 Modélisation H

11.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation H permet de prendre en compte par des éléments finis (modélisation « full-FEM ») tous les domaines en ISFS : structure, fluide et sol par éléments 3D, modélisations respectives 3D et 3D_FLUIDE, et frontière extérieure du sol et fond de retenue par éléments absorbants 2D, modélisations respectives 3D_ABSO et 3D_FLUI_ABSO.

La résolution dynamique s'opère complètement par Code_Aster au moyen de l'opérateur de calcul linéaire DYNA_VIBRA par un calcul harmonique sur base modale en prenant en compte un chargement sismique dans la direction horizontale X avec une excitation de type mono-appui calculée au moyen de l'opérateur CALC_CHAR_SEISME .

11.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage du modèle comprend, outre la structure de barrage proprement dite, des domaines volumiques de sol et de fluide, ainsi que leurs frontières surfaciques.

En particulier (cf. Figure 11.2-a) :

Le maillage fourni à Code_Aster comprend au total 1745 nœuds et les éléments suivants :

- Le maillage volumique de la structure de barrage de 84 éléments PENTA15 et HEXA20 dans le groupe *STRVOU* ,
- Le maillage volumique du domaine fluide de 532 éléments PENTA15 et HEXA20 dans le groupe *FLUIDE* ,
- Le maillage volumique du domaine sol en enrochement de 1260 éléments PENTA15 et HEXA20 dans le groupe *VOLSOL* ,
- Le maillage surfacique de la frontière absorbante élastique à l'extérieur du sol comprenant 540 éléments QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *TH - SOL* .
- Le maillage surfacique de la frontière absorbante fluide en fond de retenue comprenant 76 éléments surfaciques QUAD8 et TRIA6 dans le groupe *IFLUSOLF* .

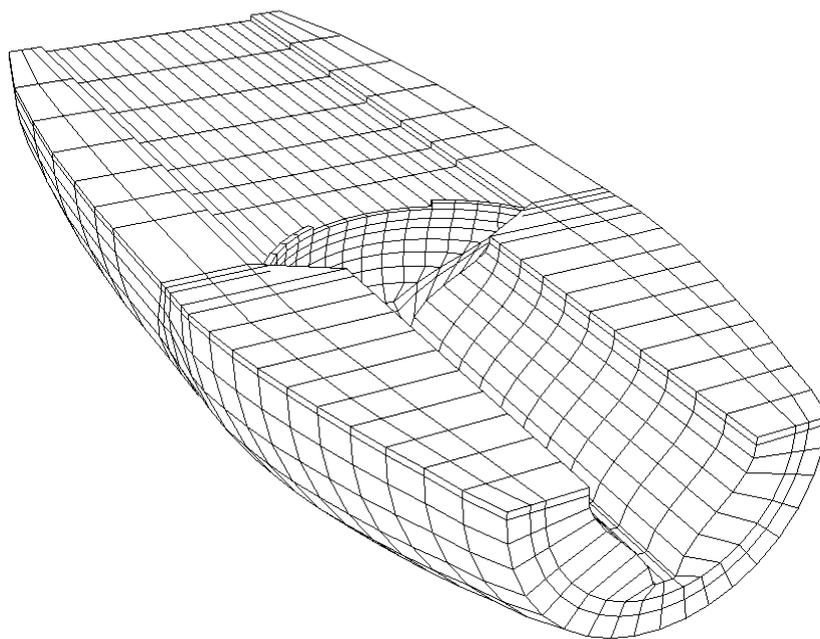


Figure 11.2-a : modèle complet « full-FEM » du barrage, du sol et de sa retenue

11.3 Conditions aux limites et chargements mécaniques

On excite la structure dans la direction horizontale X avec un chargement d'accélération imposée à la surface du sol en champ lointain harmonique $y = y_o \sin \omega t$ de module unitaire pour différentes pulsations. Pour imposer ce chargement sismique, on bloque le nœud *NO6288* à la base du domaine de sol et on impose au groupe de nœuds *TH_SOL* à la frontière du sol une condition de liaison solide. Le vecteur de chargement est calculé alors par l'opérateur *CALC_CHAR_SEISME* avec l'option de type mono-appui.

On calcule les modes propres avec cette condition complétée par les modes statiques de type contraint à partir de cette condition limite d'encastrement. La résolution s'opère alors en harmonique sur cette base de Ritz complète.

11.4 Grandeurs testées et résultats

On teste en m/s^2 l'accélération maximale dans la direction X obtenue au nœud *NO10027*, milieu du bord supérieur du barrage, à la fois sur l'accélérogramme temporel ainsi que sur le spectre de réponse d'oscillateur correspondant (*SRO*) pour un amortissement de 5 %.

Les résultats de l'accélération maximale sont synthétisés sur le tableau ci-dessous :

| Calcul Laplace-temps | Accélération (m/s^2) |
|------------------------|--------------------------|
| ACCEX ($t = 1.0 s$) | 5,04 |
| SROX ($f = 10.7 Hz$) | 19,31 |

11.5 Synthèse des résultats

On retrouve alors des résultats proches de ceux de la modélisation D sans variabilité spatiale qui constituent la référence *AUTRE_ASTER*.