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.

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

La modélisation I valide l'utilisation du chargement onde plane en harmonique, par comparaison avec une résolution avec chargement sismique inertiel.

La modélisation J complète la modélisation C par la validation de la fonctionnalité de modélisation de la masse ajoutée de fluide en 2D par affectation de masses ponctuelles par unité d'épaisseur 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 fréquences propres d'un barrage obtenues avec une modélisation comprenant la retenue d'eau ainsi que l'interface fluide-structure, à condition d'augmenter la célérité de l'eau afin de représenter l'hypothèse d'incompressibilité.

La modélisation K contribue à la validation de la fonctionnalité de sollicitation par une source ponctuelle dans le sol définie par SOURCE_SOL dans l'appel à CALC_MISS option FICHIER.. On vérifie qu'on obtient des valeurs calculées de réponse de même ordre de grandeur que celles de la modélisation B, dont on reprend le modèle et qui procède entre autres au calcul de la réponse harmonique à la force sismique incidente unitaire horizontale de type classique par onde plane de direction verticale pour les 2 mêmes fréquences : à 0.1 Hz et à la fréquence de résonance de 3 Hz.

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

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.

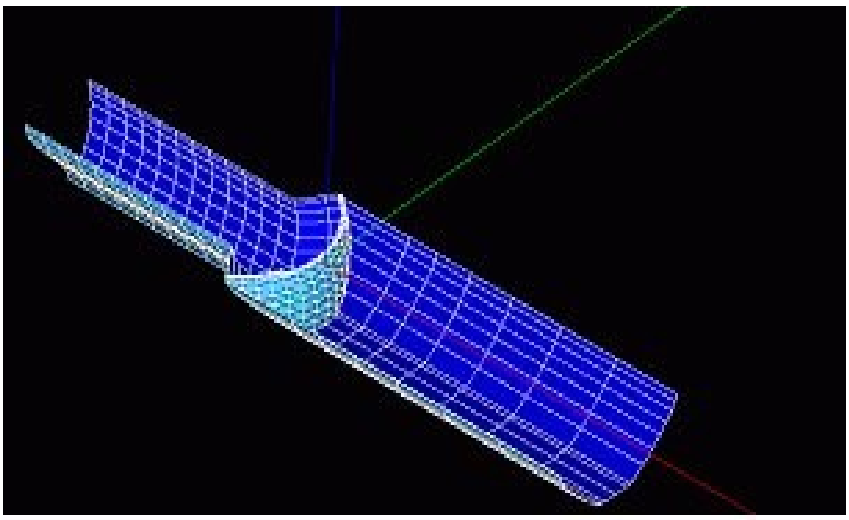


Figure 1.1-a : modèle complet du barrage et de sa retenue avec ses interfaces

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

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

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

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

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 $N130$ 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 $N130$ 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.

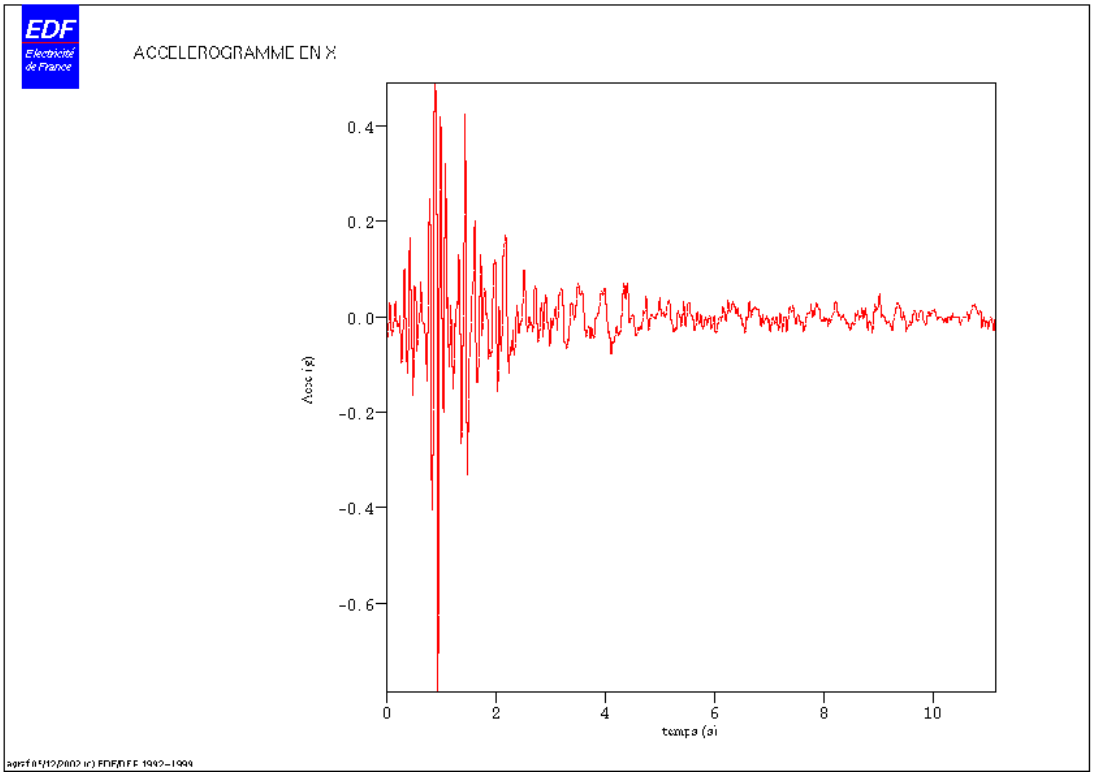


Figure 1.3-a : Accélération en X

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

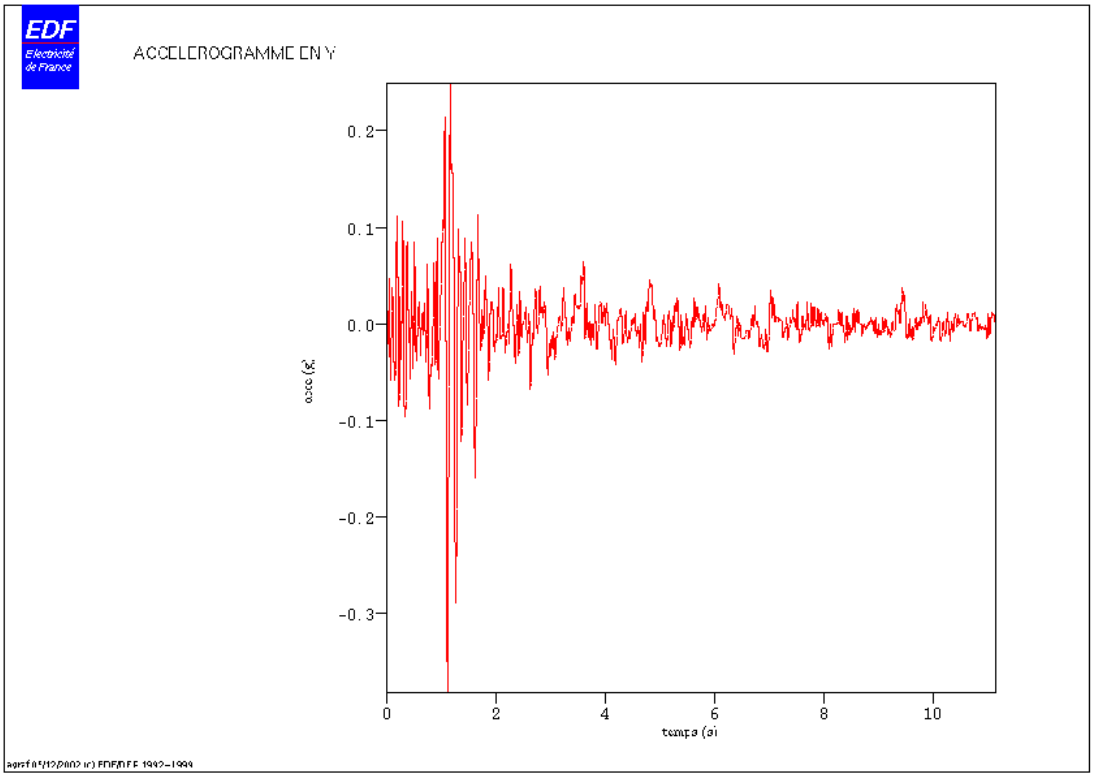


Figure 1.3-b : Accélération en Y

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

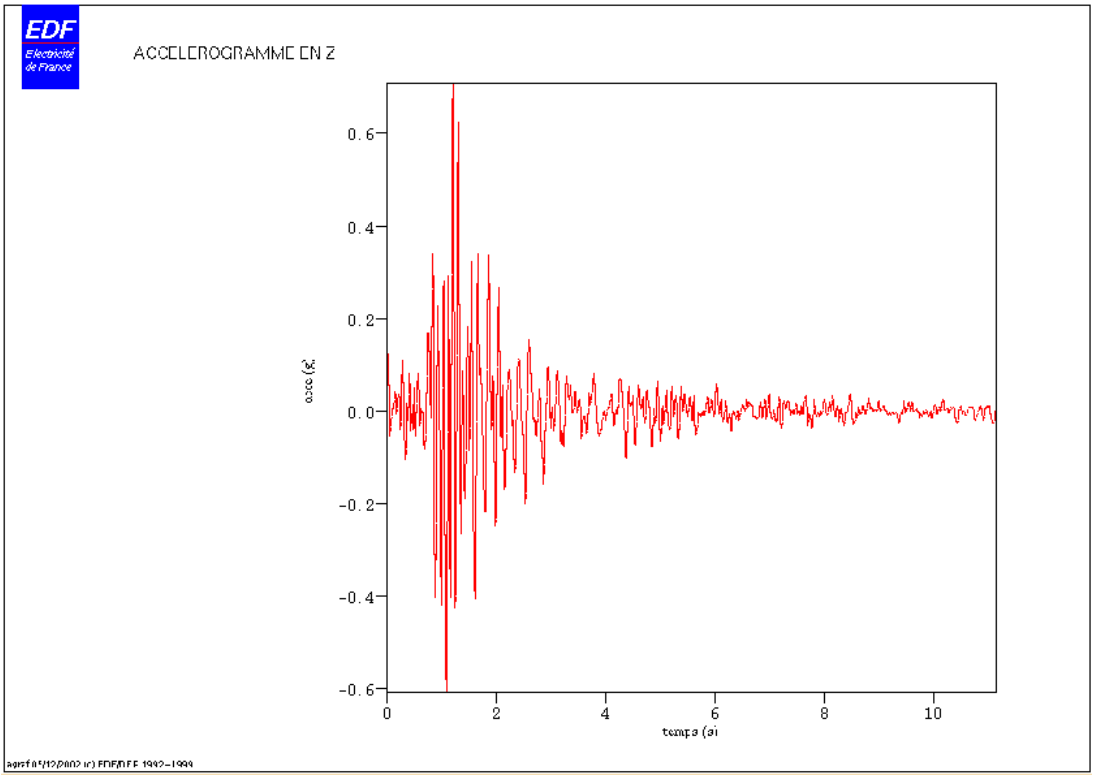


Figure 1.3-c : Accélération en Z

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 $N1909$, 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 $N1996$.

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 :

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

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.

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

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 $\gamma = \gamma_o \sin \omega t$ 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.

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

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.

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

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 $IFLUSTR$.

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 $IFLUSTR$ 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.

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

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.

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

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%.

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

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 $0{,}2\,s$ 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 $0{,}05\,s$ quart de période respectivement comme réponses transitoires à l'accélération transitoire sinusoïdale unitaire imposée avec une fréquence $5.0\,Hz$.

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

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 .

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

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 ($t=1.0\,s$)	4,68
SROX ($f=10.7\,Hz$)	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 .

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

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 $IFLUSOLF$.

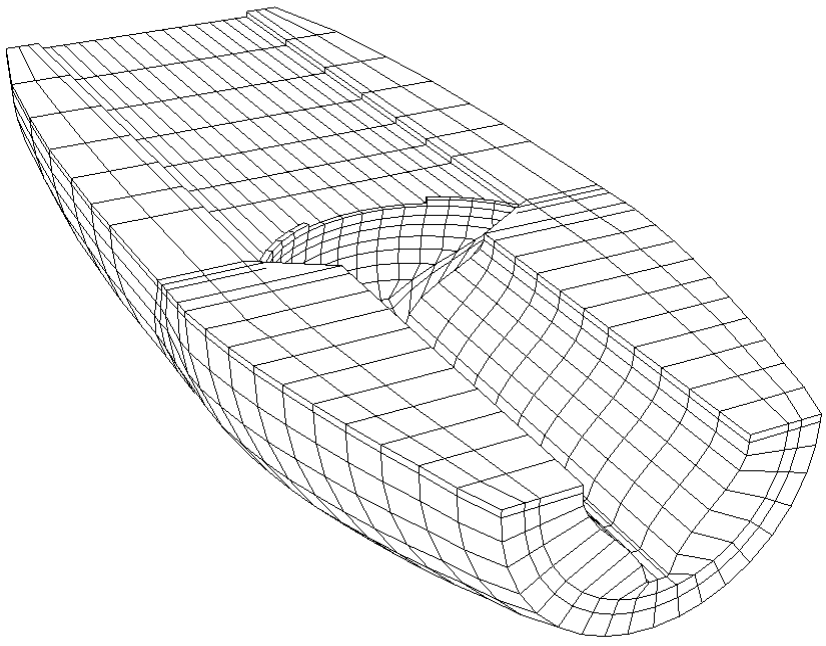


Figure 11.2-a : modèle complet « full-FEM » du barrage, du sol et de sa retenue

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

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 $\gamma = \gamma_o \sin \omega t$ 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 .

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

12 Modélisation I

12.1 Caractéristiques de la modélisation

On reprend ici la modélisation H qui 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.
Pour la modélisation I la résolution dynamique s'opère complètement avec l'opérateur de calcul linéaire DYNA_VIBRA par un calcul harmonique sur base physique. Le chargement sismique utilisé dans ce calcul correspond à l'évolution transitoire d'une onde plane de type SV (direction horizontale X), à incidence verticale, calculée au moyen de l'opérateur AFFE_CHAR_MECA_F qui par la suite, est évalué dans le domaine fréquentiel suivant une démarche particulière à l'aide de l'opérateur REST_SPEC_TEMP.
Pour une résolution harmonique, on a la possibilité de représenter l'amortissement de la structure de deux façons : soit sous forme d'amortissement de Rayleigh qui sera assemblé dans la matrice AMOR_MECA , soit sous forme d'amortissement hystérétique dont l'assemblage nécessitera la constitution de la matrice et du mot clé RIGI_MECA_HYST . C'est cette dernière forme qui est choisie dans le cas test, les résultats de l'autre forme servant de référence AUTRE_ASTER .
On considère également une dépendance du module d'Young du matériau béton à une variable de commande liée à la géométrie du maillage.

12.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage de la modélisation H est également utilisé. Néanmoins, deux groupes de nœuds $GNOB$ et $GNOH$ correspondant respectivement à un nœud en bas et en haut du barrage ont été rajoutés pour simplifier le post-traitement.

12.3 Conditions aux limites et chargements mécaniques

Le calcul étant harmonique, le chargement en forme d'onde plane SV (direction X) calculé à l'aide de AFFE_CHAR_MECA_F dans le domaine temporel doit être transformé dans le domaine fréquentiel.

Pour ce faire, une boucle fréquentielle doit être d'abord mise en place pour constituer une évolution de type DYNA_TRANS avec les vecteurs globaux de second membre contenant la contribution de tous les chargements (P, SV, SH). Puis, c'est au moyen de l'opérateur REST_SPEC_TEMP que l'évolution de type DYNA_TRANS est transformée dans une évolution harmonique qui alimentera le second membre d'un calcul DYNA_VIBRA. La liste de fréquences de calcul doit être cohérente avec la FFT des signaux sismiques. Finalement, on peut réutiliser l'opérateur REST_SPEC_TEMP pour ramener le résultat de DYNA_VIBRA dans le domaine temporel.

De même, pour pouvoir tenir compte des impédances acoustiques (produit de la masse volumique et la célérité des ondes) définies au niveau de la frontière extérieure du domaine fluide ($IFLUSOLF$), le calcul particulier d'une charge assemblée (avec l'option IMPE_FACE) ainsi que le renseignement du mot-clé MATR_IMPE_PHI dans l'opérateur de calcul DYNA_VIBRA ont dû être réalisés.

12.4 Grandeurs testées et résultats

Pour un calcul de durée $T_{FIN}=0,32\,s$, on teste en m/s^2 l'accélération maximale dans la direction X obtenue au nœud $GNOH$, 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 %. On se compare aux résultats obtenus avec le même modèle mais avec un chargement sismique inertiel.
Les résultats de l'accélération maximale sont synthétisés sur le tableau ci-dessous :

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

Calcul Laplace-temps	Accélération (m/s^2)
ACCEX ($t=0.27\,s$)	1,26
SROX ($f=10.7\,Hz$)	3,41

La durée du calcul est paramétrable afin d'offrir la possibilité d'évaluer les mêmes grandeurs sur un calcul plus long. En particulier, pour une durée de $T_{FIN}=20{,}48\,s$ les résultats de l'accélération maximale sont fournis sur le tableau ci-dessous :

Calcul Laplace-temps	Accélération (m/s^2)
ACCEX ($t=1.02\,s$)	4.52
SROX ($f=10.7\,Hz$)	17.40

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

13 Modélisation J

13.1 Caractéristiques de la modélisation et du maillage

La modélisation J complète l a modélisation C par la validation de la fonctionnalité de modélisation de la masse ajoutée de fluide en 2D par affectation de masses ponctuelles par unité d'épaisseur 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.
Le maillage 2D du modèle (cf. Figure 1 3 . 1 -a) comprend, outre la structure de barrage proprement dite, des domaines surfaciques de sol et de fluide, ainsi que leurs frontières linéiques :

- Le maillage fourni à *Code_Aster* comprend au total 1745 nœuds et les éléments suivants :
- Le maillage surfacique de la structure de barrage de 225 éléments TRIA3 et QUAD4 dans le groupe $barrage$,
- Le maillage surfacique du domaine fluide de 294 éléments TRIA3 et QUAD4 dans le groupe $fluide$,
- Le maillage surfacique du domaine sol en enrochement de 887 éléments TRIA3 et QUAD4 dans le groupe $FONDAT$,
- Le maillage linéique de la frontière absorbante élastique à l'extérieur du sol comprenant 85 éléments SEG2 dans le groupe $FOND$.
- Le maillage linéique de la frontière absorbante fluide en fond de retenue comprenant 15 éléments SEG2 dans le groupe $infeau$.

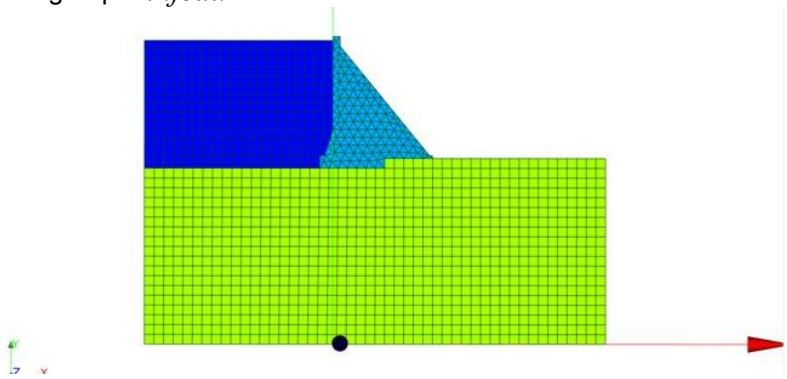


Figure 13.1-a : modèle complet 2D « full-FEM » du barrage, du sol et de sa retenue

13.2 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 $FOND$ qui constitue le fond de la fondation. On affecte ensuite des caractéristiques de masse ponctuelle sur l'interface fluide-structure constituée par le groupe $barreau$ au moyen de l'option MASS_AJOU de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM.

13.3 Grandeurs testées et résultats

On procède au calcul des 2 premières fréquences propres en X et Y .
On obtient respectivement : $2.77\,Hz$, $3.57\,Hz$.

13.4 Synthèse des résultats

Les résultats fréquentiels correspondent exactement à $0{,}2\,\%$ près aux fréquences propres d'un barrage obtenues avec une modélisation comprenant la retenue d'eau ainsi que l'interface fluide-

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

structure, à condition d'augmenter la célérité de l'eau afin de représenter l'hypothèse d'incompressibilité.

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

14 Modélisation K

14.1 Caractéristiques de la modélisation et du maillage

La modélisation K contribue à la validation de la fonctionnalité de sollicitation par une source ponctuelle dans le sol définie par SOURCE_SOL dans l'appel à CALC_MISS option FICHIER.
Le maillage fourni à *Code_Aster* est exactement le même que celui de de la modélisation B.

14.2 Conditions aux limites et chargements mécaniques

On excite la structure dans la direction horizontale X avec un chargement de source ponctuelle prise en un point dans le sol proche du bord supérieur du barrage sous la forme d'un déplacement imposé $u=u_o \sin \omega t$ de module unitaire pour différentes pulsations.
La force sismique obtenue correspondant à un mouv ement unitaire imposé est rendue homogène à une force imposée par produit par la valeur d'impédance horizontale $Kx=3.6\mathrm{E}13\ N/m$.
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.

14.3 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, pour la réponse quasi-statique et la fréquence de résonance de 3 Hz.
Les résultats de l'accélération maximale sont synthétisés sur le tableau ci-dessous :

Calcul Laplace-temps	Accélération (m/s^2)
ACCEX $f=0,1\ Hz$ ()	1,047
ACCEX ($f=3.0\ Hz$)	4,057

14.4 Synthèse des résultats

On obtient des valeurs calculées de même ordre de grandeur que celles de la modélisation B qui procède entre autres au calcul de la réponse harmonique à la force sismique incidente unitaire horizontale de type classique par onde plane de direction verticale pour les 2 mêmes fréquences à 0.1 Hz et à la fréquence de résonance de 3 Hz.

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