

---

## 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.

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.

## 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.

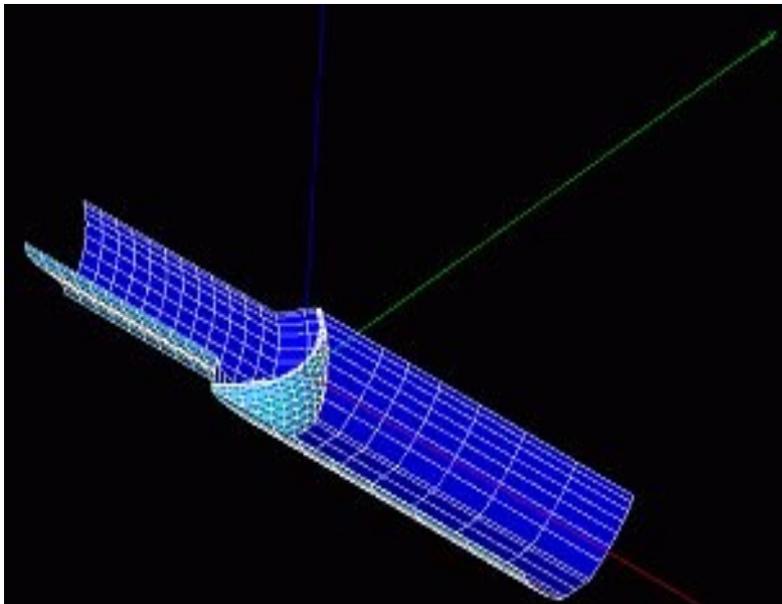


Figure 1.1-a : modèle complet du barrage et de sa retenue avec ses interfaces

### 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
$\nu$	0.2
$\rho$	2400 Kg/m <sup>3</sup>

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 <sup>3</sup>
BETA	0.1

Tableau 1.2-b : caractéristiques du sol

## Le fluide

Célérité	1500 m/s
RHO	1000. kg/m <sup>3</sup>
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*.

### 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 du système couplé.

### 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.

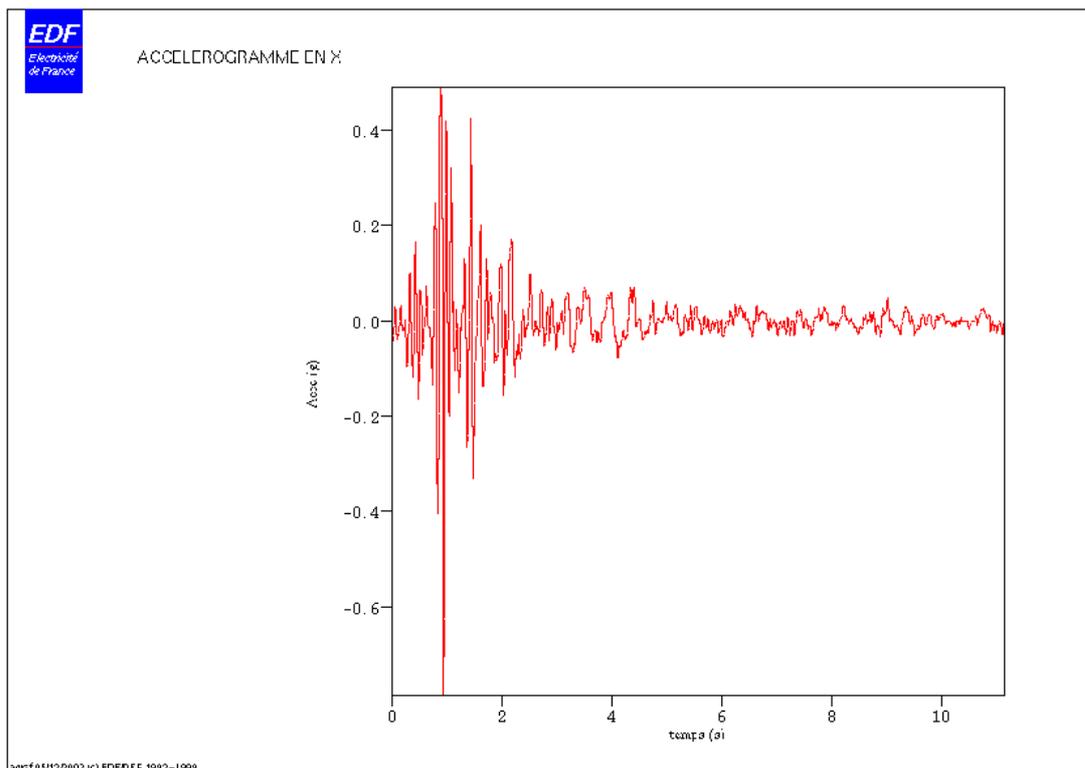


Figure 1.3-a : Accélération en  $X$

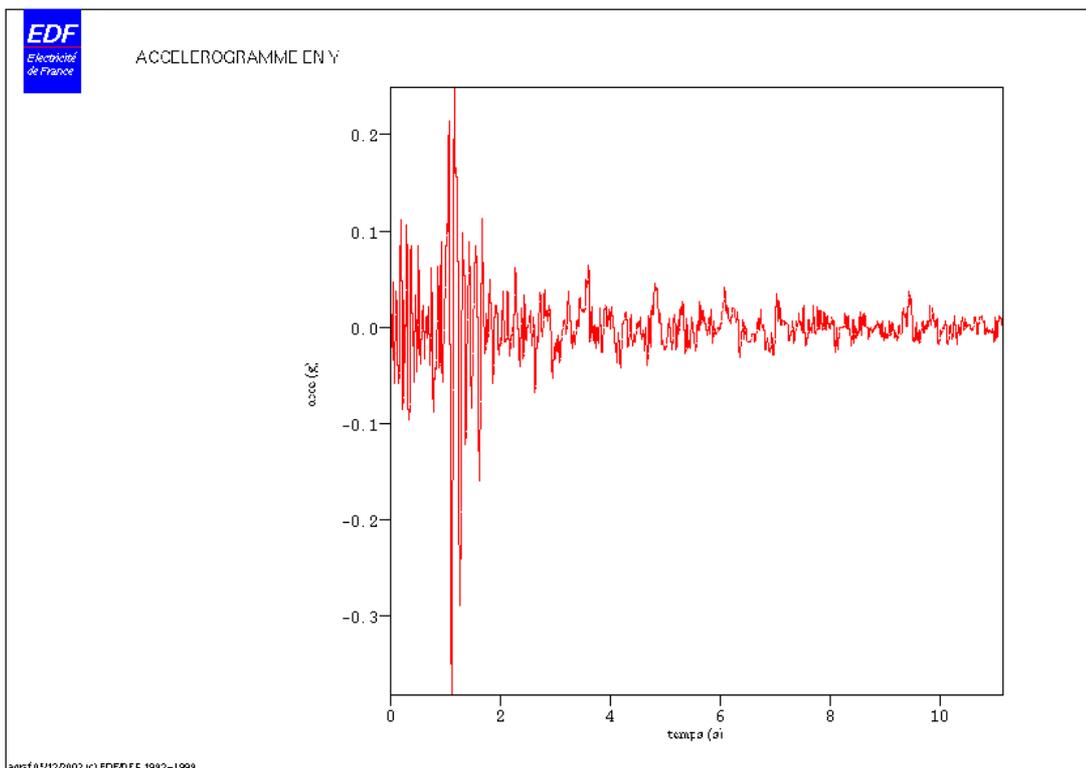


Figure 1.3-b : Accélération en  $Y$

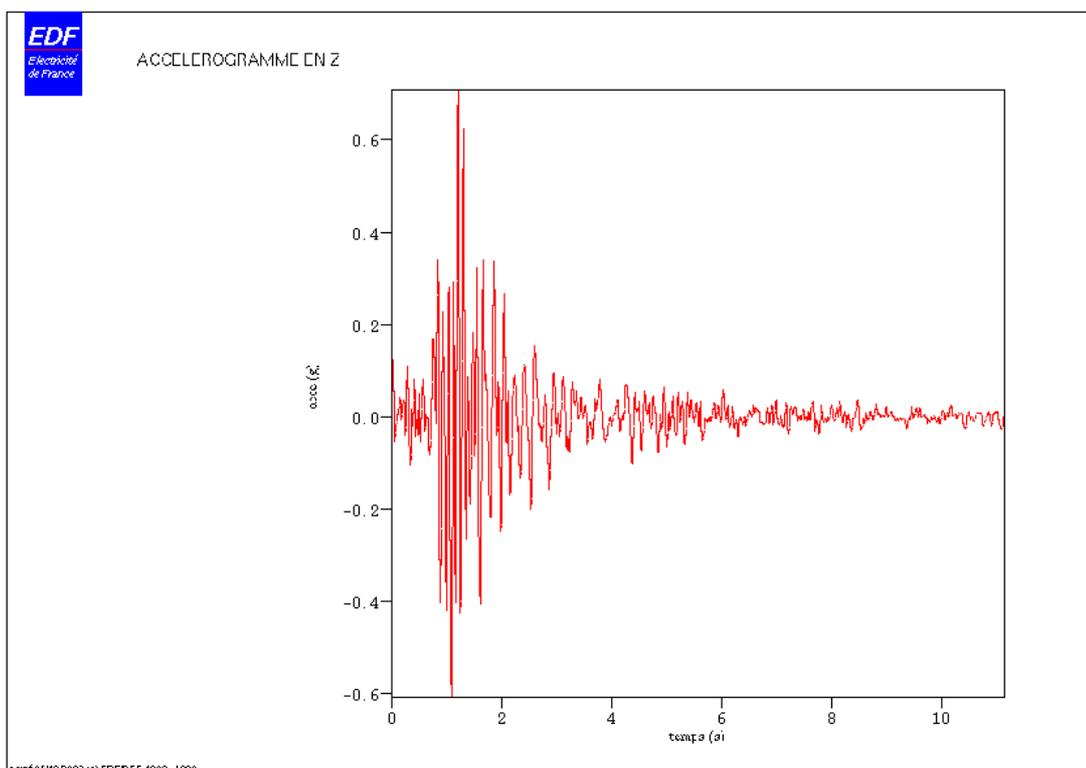


Figure 1.3-c : Accélération en  $Z$

## 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.

## 4 Résultats de la modélisation A

### 4.1 Valeurs testées

Identification	Référence( $m/s^2$ )
ACCEX ( $t=1.0 s$ )	5.85886
SROX ( $f=9.0 Hz$ )	17.6053
ACCEY ( $t=1.0 s$ )	2.80757
SROY ( $f=9.0 Hz$ )	9.7625
ACCEZ ( $t=1.02 s$ )	-0.77467
SROZ ( $f=17.4 Hz$ )	3.81459

### 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*.

## 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.

## 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 `IFLISTR`.

### 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 `IFLISTR` 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 :  $3.5\text{ Hz}$ ,  $3.6\text{ Hz}$ ,  $4.9\text{ Hz}$ ,  $6.1\text{ Hz}$ .

### 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. Cela revient dans *Code\_Aster* à imposer ce chargement au moyen du mot clé `EXCIT_SOL` dans `IMPR_MISS_3D`.

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 :

<b>Sans Variabilité</b>	<b>Accélération ( <math>m/s^2</math> )</b>
ACCEX ( $t = 1.0 s$ )	5.56
SROX ( $f = 10.7 Hz$ )	17.62
<b>Avec Variabilité</b>	<b>Accélération ( <math>m/s^2</math> )</b>
ACCEX ( $t = 1.0 s$ )	4.36
SROX ( $f = 10,7 Hz$ )	13.69

## 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%.