SDNP002 – Modélisation du barrage de San Fernando sous chargement sismique de 1971

Résumé :

Ce cas test décrit la modélisation numérique de la construction par couches, de la mise en eau et de la sollicitation dynamique du barrage de San Fernando soumis à un séisme magnitude $M_w = 6.6$. La modélisation prend en compte à la fois le couplage hydromécanique et la plastification du sol. Le comportement non-linéaire est modélisé par la loi Hujeux. Le signal sismique est introduit à l'aide d'une frontière absorbante.

La modélisation suivante est considérée :

- modélisation A : la modélisation hydromécanique sous-intégrée D_PLAN_HM_SI est utilisée. L'algorithme utilisé pour la phase de construction par couches en statique pour la loi Hujeux est ALGO_INTE = SPECIFIQUE, de mise en eau et consolidation statique ALGO_INTE = SEMI_EXPLICITE, et en dynamique ALGO_INTE = BASCULE_EXPLICITE ;

L'objectif de ce cas de validation est de donner un exemple d'un calcul de barrage dans code_aster. Seule 1 seconde du chargement dynamique est appliqué pour des raisons de temps de calcul. Les valeurs des déplacements n'ont pas de signification car la fonction ARRET=NON est utilisée.

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

1 Problème de référence

1.1 Description de l'étude

1.1.1 Description du barrage

La construction du barrage inférieur de San Fernando a débuté en 1912 et s'est étalée jusqu'en 1915 pour les 22 premiers mètres. Les matériaux de construction utilisés pour les deux parements sont des sables fins (silts de piètre qualité), mis en place (prélevés à même la retenue) par une technique dite de « remblaiement hydraulique ». Par référence à leur technique de construction, ces deux zones sont usuellement appelées « remblais hydrauliques ». Cette technique conduit à un faible état de densité et rend donc ces matériaux particulièrement sensibles au risque de liquéfaction. En 1915 a été ajoutée une couche de 6 *m* en silt argileux. De 1916 à 1930, le barrage a été rehaussé jusqu'à une hauteur de 42.7 *m* avec cette fois du matériau compacté. Enfin, en 1940 a été mise en place une recharge aval en enrochements afin d'accroître la sécurité de l'ouvrage. La représentation d'une coupe transversale du barrage est donnée sur la Figure 1.1.1-a.

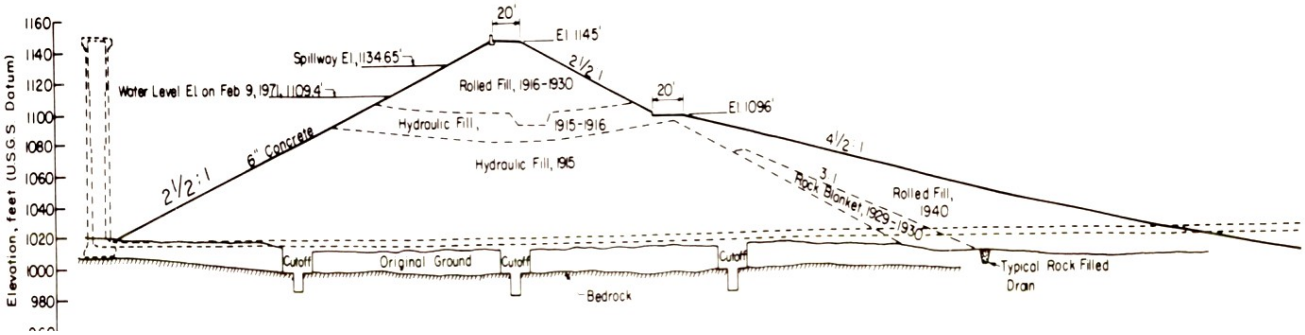


Figure 1.1.1-a : Coupe transversale du barrage inférieur de San Fernando.

La mise en eau du barrage a duré deux ans.
Le 9 février 1971, ce barrage californien a vu sa crête se tasser de 8,5 mètres suie à la liquéfaction du remblai hydraulique amont induite par un séisme de magnitude 6,6 sur l'échelle de Richter.



Figure 1.1.1-b : Vue générale du barrage inférieur de San Fernando et de son état de rupture après le séisme.

Les 80.000 habitants de la vallée en contrebas ont été évacués en catastrophe, de crainte que l'ouvrage ne cède entièrement. Le réservoir de 15 millions de mètres cubes d'eau a pu être vidé sans incidents en trois jours. La rupture du barrage s'est produite environ 60 secondes après la fin du séisme. La note [1] présente l'étude réalisée en 2013. Ce cas test s'appuie dessus.

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

1.1.2 Description du séisme

Le barrage de San Fernando est soumis au séisme de 1971, dont l'accélérogramme et le spectre de Fourier associé sont représentés sur la Figure 1.1.2-a. La durée du signal est de 15 secondes. L'accélération maximale du signal est ajustée à $a_{max}=0.6\,g$. Les fréquences dominantes du spectre sont situées entre 0 et 2 Hertz.

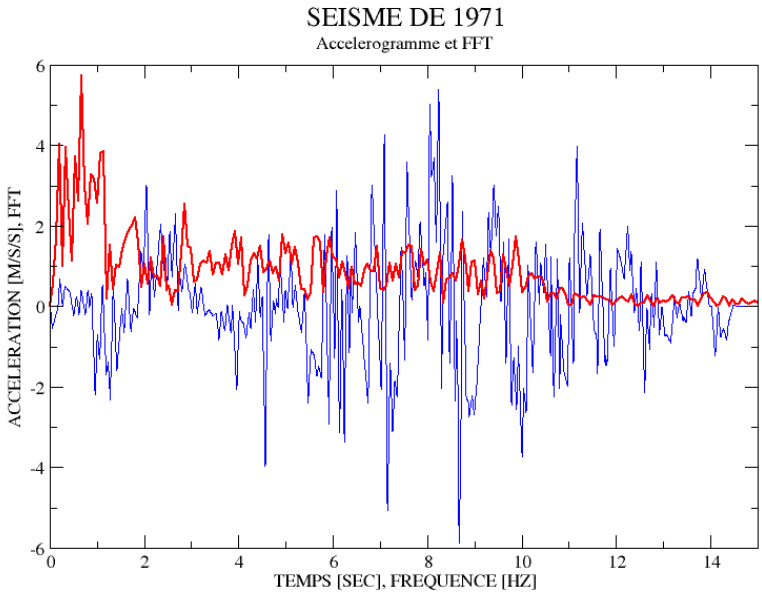
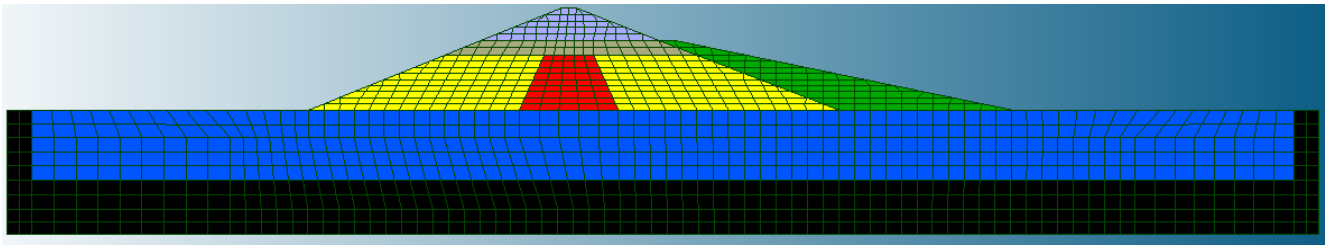


Figure 1.1.2-a : Accélérogramme du séisme de San Fernando de 1971 et spectre associé.

1.2 Description du maillage

Le maillage du barrage est bidimensionnel (déformation plane) et correspond à la plus grande section transversale, comme illustrée sur la Figure 1.2-a . Il est constitué de 1897 éléments quadratiques dont 1071 QUAD8 et 51 TRIA6 soit un total de 3497 nœuds. Il est issu du maillage fourni par le CIH auquel une fondation plus large a été ajouté afin de suivre les recommandation de la note [2]. La fondation (en bleue) est posée sur un « rocher » (en noir) dont le comportement, purement mécanique, est élastique linéaire. Le reste du barrage est représenté par un domaine hydromécanique couplé parfaitement saturé avec une matrice solide au comportement élasto-plastique modélisé par la loi de Hujeux. Les différentes zones du barrage sont représentées par un code couleur dans la Figure 1.2-a, et leur correspondance avec les paramètres matériaux de la loi de Hujeux est donnée dans le Tableau 1.4.1-1.

Le parement aval, représenté en vert, est dans la réalité constitué d'enrochements plus grossiers ne retenant pas l'eau, et dont le comportement sera modélisé par un domaine purement mécanique. Dans la pratique, une condition de pression nulle tout au long du calcul est imposée dans cette zone.



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

Figure 1.2-a : Maillage du barrage de San Fernando

1.3 Modélisation

La modélisation est D_PLAN_HM_SI dans le barrage et dans la fondation. Une modélisation D_PLAN est appliquée au rocher.

1.4 Propriétés des matériaux

1.4.1 Propriétés mécaniques

Les paramètres de la loi de Hujeux donnés par le CIH pour les différentes zones du barrage sont décrits dans le Tableau 1.4.1-1 ci-après. La correspondance des données matériaux avec ces zones est retranscrite par un code couleur, Figure 1.2-a .

Les données importantes sont la contrainte critique P_{ci} et le paramètre a_{mon} :

- Le paramètre P_{ci} est lié à l'état de densité initiale du matériau et détermine sa plus grande propension à se contracter (sable lâche) sous chargements de cisaillement cyclique quand la valeur est plus faible, ou à se dilater (sable dense) quand la valeur est plus grande.
- Le paramètre a_{mon} contrôle la plus grande capacité du sol à générer de la pression interstitielle, quand la valeur est plus faible.

En diminuant conjointement la valeur de ces deux paramètres, le matériau granulaire caractérisera un sable « lâche » et aura tendance à se contracter sous chargement de cisaillement en générant de la pression interstitielle. Le risque de liquéfaction (diminution importante, voire annulation de la pression moyenne effectives au sein du matériau) sera alors plus élevé. Dans ces conditions, il apparaît que le matériau sableux constituant les parements du barrage présente un risque élevé de liquéfaction. Le parement amont, une fois gorgé d'eau et potentiellement liquéfiable, constitue a priori le point faible du barrage, conformément au profil de rupture suggéré dans la 1.1.1-b

Paramètres Hujeux	Rocher	Fondation	Sable	Noyau	Surcouche compactée	Argile	Remblais
$K[MPa]$	90	905.2	380	95	266	95	266
$G[MPa]$	50	50	228	57	122	57	122
$\rho_{grain}[kg/m^{-3}]$	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700
Porosité	0,44	0,44	0,44	0,49	0,55	0,49	0,55
$p_{réf}[MPa]$	-	1	1	1	1	1	1
$p'_{c0}=d\,p'_{crit0}[MPa]$	-	40	0,09	0,11	10	0,11	10
n	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\phi[°]$	-	35	33	28	35	28	35
$\psi[°]$	-	35	31	28	35	28	35
β	-	32	27	27	33	27	33
a_{mon}	-	6.10^{-3}	8.10^{-4}	5.10^{-3}	13.10^{-4}	5.10^{-3}	13.10^{-4}
a_{cyc}	-	8.10^{-4}	4.10^{-4}	3.10^{-3}	5.10^{-4}	3.10^{-3}	5.10^{-4}
c_{mon}	-	5.10^{-3}	0,02	0,02	10^{-4}	0,02	10^{-4}

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

c_{cyc}	-	25.10^{-4}	0,01	0,01	10^{-4}	0,01	10^{-4}
b	-	0,05	0,05	0,12	0,1	0,12	0,1
d	-	2	8	2,5	2,5	2,5	2,5
X_m	-	2,4	2	3	2	3	2
α	-	1	0,5	0,4	1	0,4	1
$r_d^{éla}$	-	0,02	0,001	0,01	0,002	0,01	0,002
$r_i^{éla}$	-	0,04	0,09	0,3	0,1	0,3	0,1
r^{hys}	-	0,04	0,09	0,3	0,1	0,3	0,1
r^{mob}	-	0,8	0,8	0,8	0,5	0,8	0,5

Tableau 1.4.1-1 : Valeurs des paramètres de la loi Hujeux pour le barrage de San Fernando

Le document de référence du Code_Aster R7.01.23 [3] donne une description détaillée des paramètres de la loi de Hujeux.

1.4.2 Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques sont fournies par le CIH. La particularité est le caractère anisotrope des propriétés hydriques. Ainsi, les deux tableaux suivants donnes les propriétés entrées dans les sous les commandes `THM_DIFFU` et `THM_LIQ` pour chacun des matériaux. Le code couleur employé est issu de la Figure 1.2-a ,

Paramètres THM_DIFFU	Rocher	Fondation	Sable	Noyau	Surcouche compactée	Argile	Remblais
$Biot(L/T/N)$	-	1	1	1	1	1	1
$\lambda_h(m.s^{-1})$	-	10^{-6}	10^{-5}	10^{-8}	-	10^{-7}	10^{-5}
$\lambda_v(m.s^{-1})$	-	10^{-7}	10^{-6}	10^{-9}	-	10^{-8}	10^{-6}

Tableau 1.4.2-1 : Paramètres de THM_DIFFU

Paramètres THM_DIFFU	Rocher	Fondation	Sable	Noyau	Surcouche compactée	Argile	Remblais
$\rho_{eau}[kg/m^3]$	-	1000	1000	1000	-	1000	1000
$K_{eau}[Pa]$	-	2.10^9	2.10^9	2.10^9	-	2.10^9	2.10^9
$VISC(Pa.s)$	-	0,001	0,001	0,001	-	0,001	0,001
$DVISTEMP(m.s^{-1})$	-	0	0	0	-	0	0

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

Tableau 1.4.2-2 : Paramètres de THM_LIQU

1.5 Conditions aux limites et chargements

L'établissement des conditions aux limites et des chargements est basé sur la méthodologie décrite dans la documentation [U2.04.08] [2]. Dans ce qui suit, les conditions aux limites et les chargements les plus importants sont rappelés, étape par étape.

1.5.1 Pour l'étape statique de construction par couches

La construction par couches s'effectue en 16 étapes par la pose de 16 couches horizontales d'épaisseur constante d'environ 2.5 m. La durée totale de l'opération est de trois ans, ce qui correspond à la période de construction entre 1912 et 1915, sans tenir compte des réfections ponctuelles ultérieures. La durée de pose chaque couche est identique et égale à 2.3 mois.

Les conditions aux limites autour de la fondation sont donc les suivantes :

- encastrement de la base de la fondation ;
- blocage du déplacement horizontal sur les côtés de la fondation ;

Les conditions initiales et aux limites lors de la construction par couches sont donc les suivantes :

- application d'une pression mécanique « petite » $P_{libre}=10\,kPa$ sur la surface libre du barrage ;
- application d'une pression hydraulique nulle $PRE1=0$

Il est seulement soumis à la pesanteur lors de la construction.

1.5.2 Mise en eau du barrage

D'après S. Rachdi [4], simuler l'étape de mise en eau après la construction par couches ou en même temps ne modifie pas significativement les champs finaux de déplacement, de contraintes et de pression interstitielle. Ce choix est fait pour réduire le temps de calcul.

La mise en eau du barrage consiste à simuler la montée de la retenue à l'amont du barrage. En termes de modélisation, cela consiste à appliquer une pression mécanique et une pression hydraulique dépendant à la fois de l'altitude et du temps sur le parement amont du barrage. Les autres conditions aux limites et de chargement restent inchangées par rapport à la fin de l'étape de construction par couches. La mise en eau du barrage eut lieu entre 1940 et 1942. La durée totale de la mise en eau est fixée à deux ans. La montée de la nappe d'eau est supposée linéaire.

1.5.3 Période de consolidation

Pour respecter l'intervalle de temps écoulé entre 1942 et 1971, une période consolidation de 30 ans est simulée avant l'application du chargement sismique, c'est-à-dire qu'on prolonge le calcul sans changement des conditions aux limites ni des chargements.

1.5.4 Étape dynamique de sollicitation sismique

L'étape de calcul dynamique est une poursuite du calcul statique. Les conditions aux limites en fin d'étape statique s'appliquent au calcul dynamique. Le seul chargement concerne les conditions aux limites autour de la fondation. Les conditions de blocage des déplacements sont d'abord remplacées par des conditions équivalentes de forces imposées. Cela est effectué grâce à l'utilisation de raideurs ponctuelles `2D_DIS_T`, permettant dans un premier temps de récupérer les valeurs de forces équivalentes, puis dans un deuxième temps de les ré-appliquer tout en se désactivant (en annulant leur propre raideur).

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

Le barrage de San Fernando est soumis au séisme de 1971. Il est décrit au paragraphe 1.1.2 .

Les petites dimensions de la fondation ne permettent pas de s'affranchir des effets de bord sur les ondes diffractées par le barrage. Ces effets indésirables sont pris en compte par l'utilisation d'éléments absorbants placés autour de la fondation. Ces éléments absorbants servent également à introduire l'accélérogramme sous la forme d'une onde plane de cisaillement (SV) d'incidence verticale à partir de la base de la fondation. Le schéma temporel implicite HHT avec $\alpha=-0,05$. Il est supposé en effet que les non linéarités matérielles suffisent pour reproduire l'amortissement physique des ondes dans le barrage. Le pas de discrétisation temporelle de départ est constant et fixé à $\Delta t=0,01s$, mais peut être subdivisé par 2 en cas de non convergence, jusqu'à un niveau de 10 subdivisions.

1.6 Paramétrage du calcul

Le calcul n'est pas parallèle pour des raisons de stabilité de la loi Hujeux. Le temps CPU total demandé est de 24 heures.

1.6.1 Pour le calcul statique

Le paramétrage général est le suivant :

- SUBD_PAS = 2 ;
- SUBD_NIVEAU = 6 ;
- Solveur MUMPS ;
- RESI_GLOB_RELA = 1.10^{-4} pour les 6 premières couches, 2.10^{-4} pour les suivantes,
- ITER_GLOB_MAXI = 10 ;

Pour la loi Hujeux :

- ALGO_INTE = SPECIFIQUE ;
- ITER_INTE_PAS = -20 ;
- ITER_INTE_MAXI = -20;
- RESI_INTE_RELA = 10^{-8};

L'option de recherche linéaire est appliquée à partir de la couche 7,

1.6.2 Pour le calcul dynamique

Par souci de limiter la durée du cas-test, on se restreint à 1 seconde de signal avec un pas de temps. Le schéma temporel utilisé est le schéma HHT avec MODI_EQUI ='OUI' et $\alpha=-0.05$.

Le paramétrage général est le suivant :

- SUBD_PAS = 2 ;
- SUBD_NIVEAU = 6 ;
- Solveur MUMPS ;
- RESI_GLOB_RELA = 5.10^{-4} ;
- ITER_GLOB_MAXI = 10 ;

Pour la loi Hujeux :

- ALGO_INTE = BASCULE _EXPLICITE
- ITER_INTE_PAS = -40 ;
- ITER_INTE_MAXI = -50 ;
- RESI_INTE_RELA = 10^{-4};

1.6.3 Redimensionnement du problème hydromécanique

Le redimensionnement hydromécanique est utilisé pour le calcul dynamique, avec les paramètres suivants : $P_0=\frac{1}{K_0}=10^{+4}$

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

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

2 Modélisation A

2.1 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation A est plane et de type hydromécanique couplé (D_PLAN_HM_SI).

2.2 Calcul de la réponse à la sollicitation sismique

Le calcul de la réponse à la sollicitation sismique s'opère sur une durée de 1 seconde. Le pas de temps est de 0.005 secondes avec un pas d'archivage de 0.01 seconde.

2.3 Fonctionnalités testées

Les nouveaux algorithmes de Hujeux sont testés :

- ALGO_INTE = SPECIFIQUE ou SEMI_EXPLICITE selon l'étape de calcul statique ;
- ALGO_INTE = BACULE_EXPLICITE pour l'étape dynamique ;

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

2.4 Grandeurs et résultats testés de la modélisation A

Ce cas test a pour objectif :

- de capitaliser dans code_aster la méthodologie de calcul sismique sur un barrage
- de capitaliser les fichiers mis à jour de l'étude sur San Fernando de 2013

Il a été choisi de réaliser le calcul en séquentiel pour des raisons de stabilité de la loi Hujeux. De plus, le signal est limité à 1 seconde pour restreindre le temps de calcul à 24 heures. Aucune mesure n'est disponible dans ces conditions. Il a donc été choisi de faire des tests numériques de non-régression. La grandeur testée est le déplacement en différents points. Le maximum de l''accélération n'est pas testé.

2.4.1 Valeur du tassement (DY) à t = 1 sec

Identification	*Nœud*	*Référence (m)*	*Tolérance*
Parement Aval	N77	-0.002179536151629261	50%
Sable lache	N95	-0.000621586203962743	50%
Sommet	N227	-0.005510830820929236	50%

Tableau 2.4.1-1

2.4.2 Valeur du déplacement (DX) à t = 1 sec

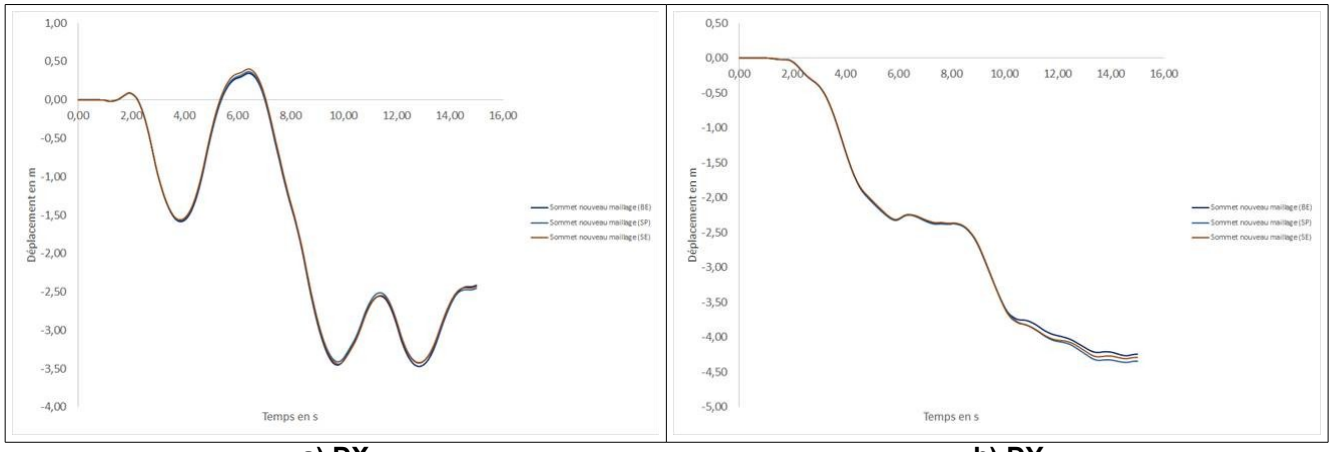
Identification	*Nœud*	*Référence*	*Tolérance*
Parement Aval	N77	-0.01050009651049759	50%
Parement Amont	N337	-0.005790385126148442	50%
Base du barrage	N206	0.0011159335435996925	50%
Sable lache	N95	-0.0014191115497306022	50%

Tableau 2.4.2-1

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

3 Synthèse des résultats de la modélisation A

Les différentes options de résolution de la loi Hujeux (SPECIFIQUE (SP), SEMI_EXPLICITE (SE) et BASCULE_EXPLICITE (BE)) ont été testées . L a Figure 3-a montrent que les 3 méthodes donnent des résultats comparables en terme de déplacement.



a) DX **b) DY**

Figure 3-a : Comparaison des déplacements au sommet du barrage suivant l'option de résolution d'Hujeux.

Toutefois, Des différences sont visibles pour les grandeurs locales comme les pressions interstitielles car les méthodes dites « explicites » ne nécessitent pas une convergence locale de la loi Hujeux. Plus d'informations de ces options sont disponibles dans le document [3].
L'intérêt majeur des méthodes explicites est la réduction de temps de calcul et la convergence plus simple réduisant l'utilisation de POURSUITE de calcul. Ainsi, les calculs avec le méthode classique de code_aster à savoir SPECIFIQUE recquiert 4 à 5 poursuites de calcul dans la partie dynamique contre 2 à 3 dans les cas SEMI_EXPLICITE et BASCULE_EXPLICITE.

Au final, le calcul est cohérent avec la réalité et les résultat obtenus en 2013 présentés dans la note de M. Kahm [1] car le barrage rompt, Figure 3-b .

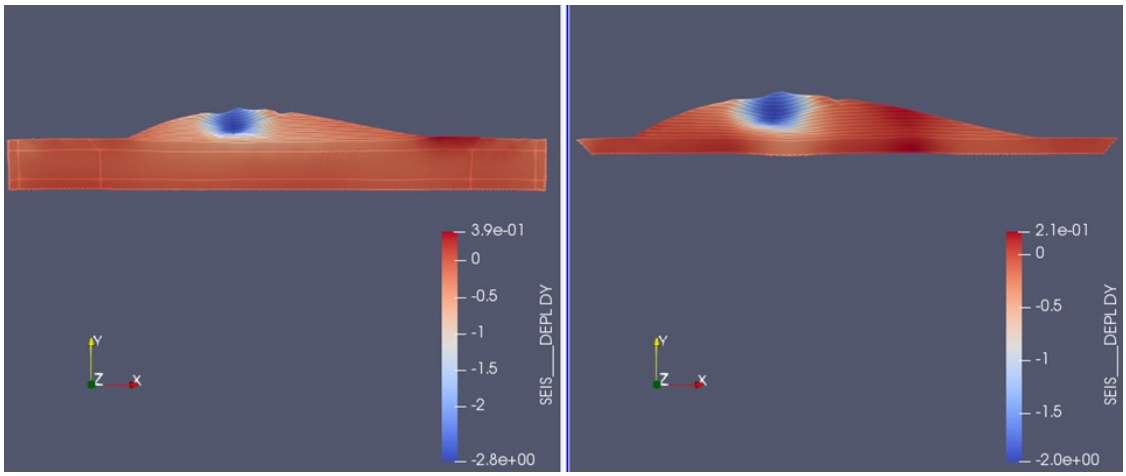


Figure 3-b : Visualisation de la déformé du barrage à 15 secondes (BE) pour les études 2013-2020

Cependant, des différences apparaissent à cause de la mise à jour de la modélisation du barrage qui suit les recommandations de la note [2]. Le calcul est passé de la Version V11 à la V14 de code_aster et le maillage a été revu,Figure 3-c.

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

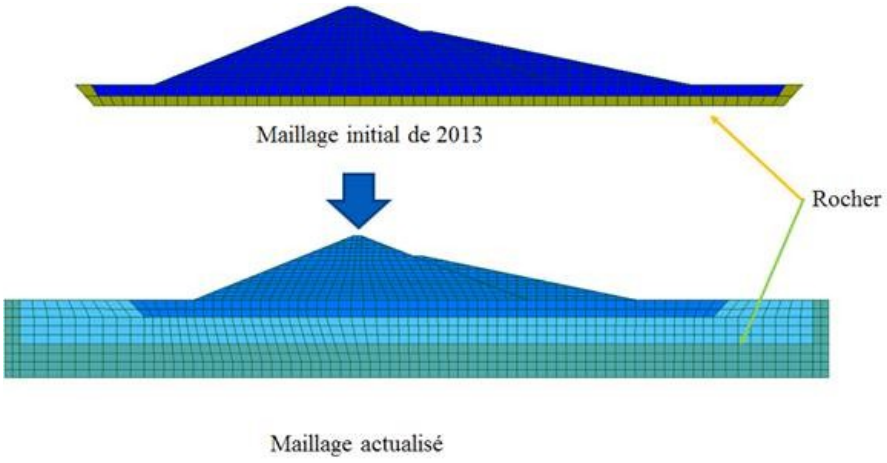
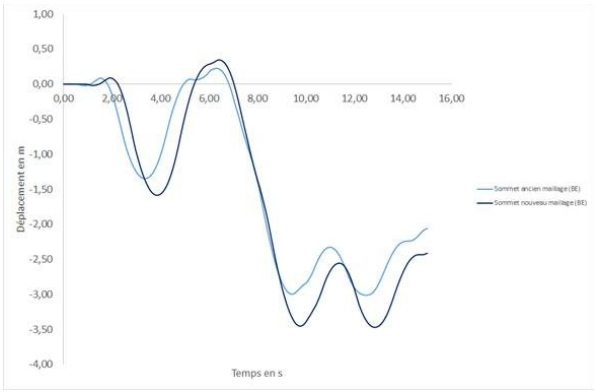
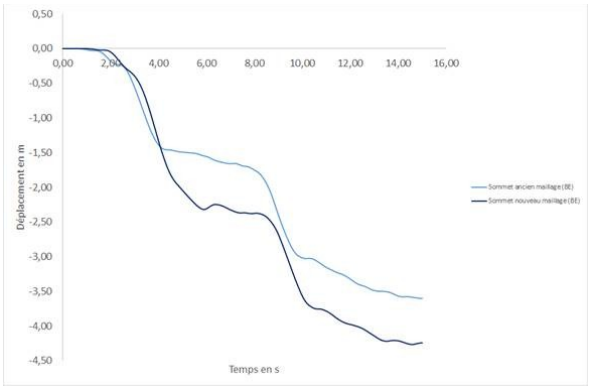


Figure 3-c : Comparaison des maillages du barrage de San Fernando de 2013 et 2020

La part plus importante de la fondation modélisée avec Hujeux induit des écarts entre les résultats de 2013 et 2020, Figure 3-d .



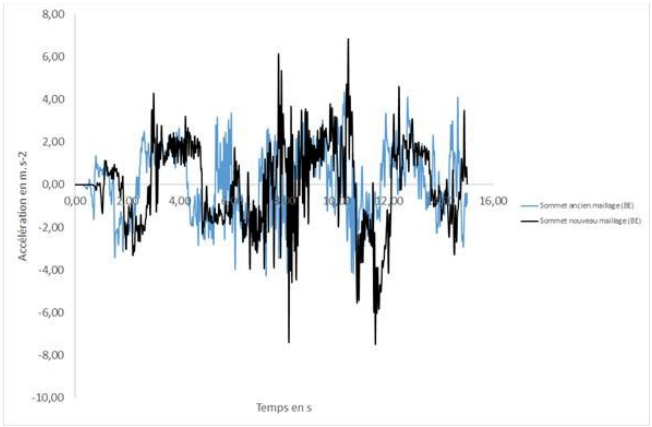
a) DX



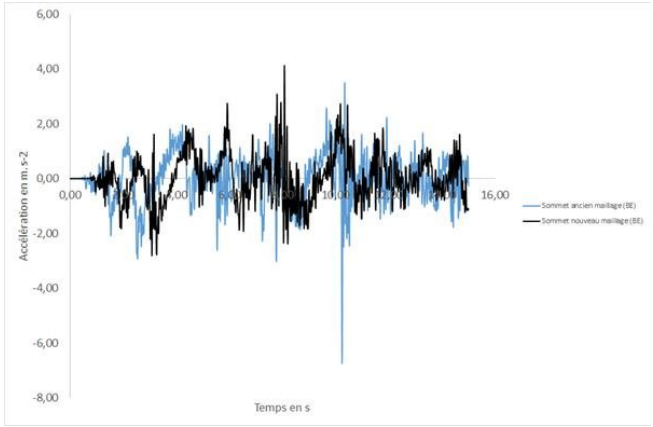
b) DY

Figure 3-d : Comparaison des déplacements au sommet du barrage pour les études 2013-2020 (BE)

Il est possible de se rapprocher du résultat de 2013 en augmentant la zone associée au rocher.



a) A X



b) A Y

Figure 3-e : Comparaison des accélérations au sommet du barrage entre les études 2013-2020 (BE).

La Figure 3-e compare les accélérations en faisant un filtrage à 20Hz.

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

4 Bibliographie

[1] Kham M . " *Modélisation numérique avec Code_Aster du barrage de San Fernando sous une excitation sismique* ", Note interne EDF R&D H-T62-2012-02570-FR, 201 3

[2] C *alculs statiques et dynamiques d'ouvrages géomécaniques avec la loi de Hujeux* , Documentation code_aster , U 2.04.08.

[3] *Loi de comportement cyclique de HUJEUX pour les sols* ", Documentation code_aster , R7.01.23.

[4] Rachdi S. "*Calcul sismique sur un barrage en remblai non-linéaire*", Rapport de stage de Master de l'école des Ponts Paristech, 2015

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