SDNP001 – Modélisation du barrage d'Aratozawa sous le séisme fort de Miyagi, 2008, avec loi de Hujeux

Résumé :

Ce cas test décrit la modélisation numérique de la construction par couches, de la mise en eau et de la sollicitation du barrage d'Aratozawa par un séisme fort, celui de Miyagi de 2008 de magnitude $M_w=7.2$ et d'accélérations maximales respectivement de $a_{x,max}=10.24\,m.s^{-2}$ pour la composante horizontale, et de $a_{y,max}=6.91\,m.s^{-2}$ pour la composante verticale. La modélisation prend en compte à la fois le couplage hydromécanique et la plastification du sol. La compressibilité du fluide est déterminée à partir du modèle Boutonnier, tandis que le comportement non-linéaire est modélisé par la loi Hujeux. Les deux composantes du signal sismique sont introduites sur la frontière absorbante.

On considère ici une modélisation :

- modélisation A : on utilise la modélisation hydromécanique sous-intégrée `D_PLAN_HM_SI`. L'algorithme utilisée en dynamique pour la loi Hujeux est `ALGO_INTE = BASCULE_EXPLCIITE` ;

Remarque :

De nombreux post-traitements présents dans ce test utilisent la bibliothèque scipy. Scipy n'est pas un prérequis de Code_Aster et n'est pas présent sur les machines de référence validant Code_Aster. Ces post-traitements ne sont donc pas testés mais seulement capitalisés dans ce test. Ils sont cependant effectués automatiquement en lançant le test sur une machine disposant de la bibliothèque scipy.

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

Le barrage d'Aratozawa est situé au nord du Japon, dans la préfecture de Myiagi (Figure 1.1.1-a) . C'est un barrage en remblai zoné à noyau central, d'une hauteur de 74.4m à sa plus grande section et d'une longueur en crête de 413.7m. Le barrage a été construit en 1991 et mis en service en 1998 pour le contrôle de l'irrigation des terres en aval. Il est constitué de cinq zones dont la représentation est donnée dans la Figure 1.1.1-b .

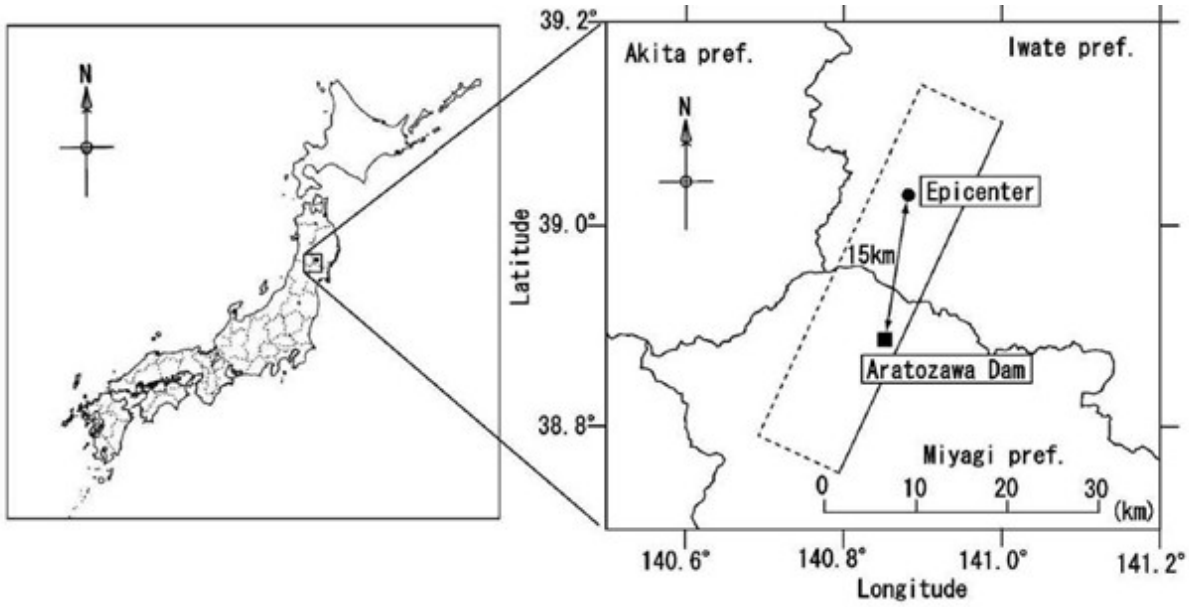
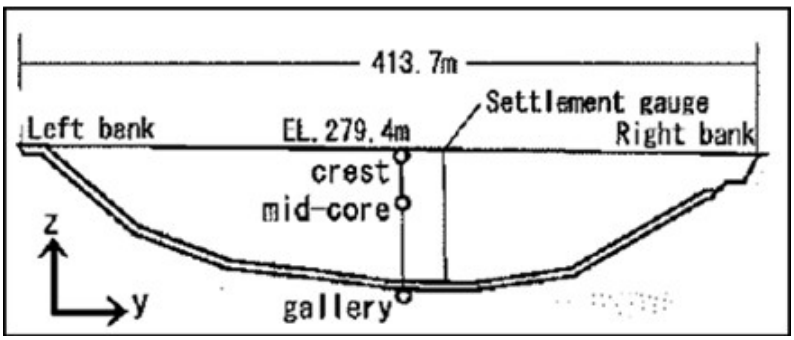


Figure 1.1.1-a : Emplacement du barrage d'Aratozawa et de l'épicentre du séisme de Miyagi, 2008 [3]



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

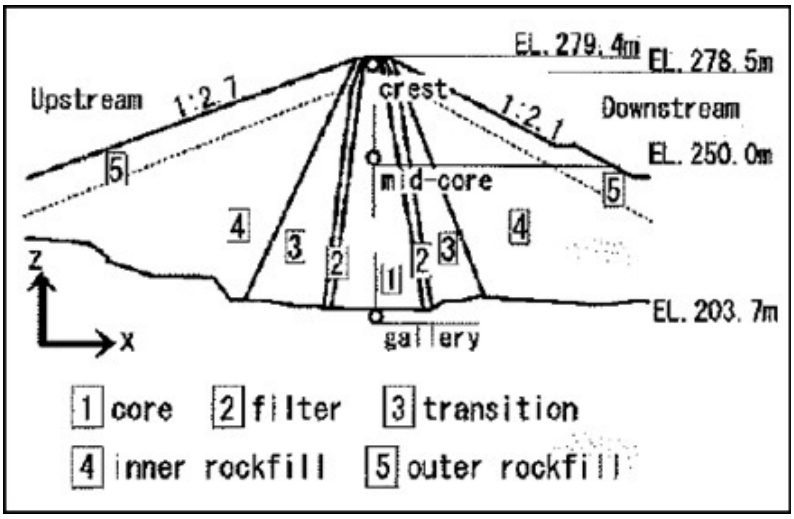
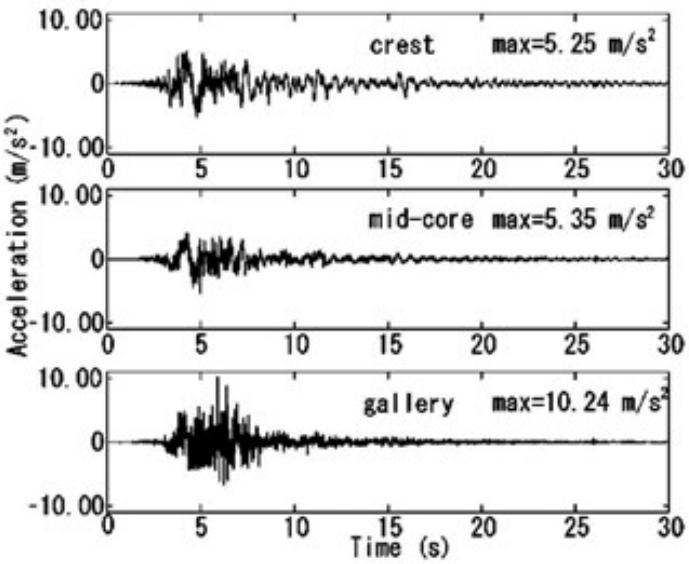


Figure 1.1.1-b : Coupes longitudinale (en haut) et transversale (en bas) du barrage

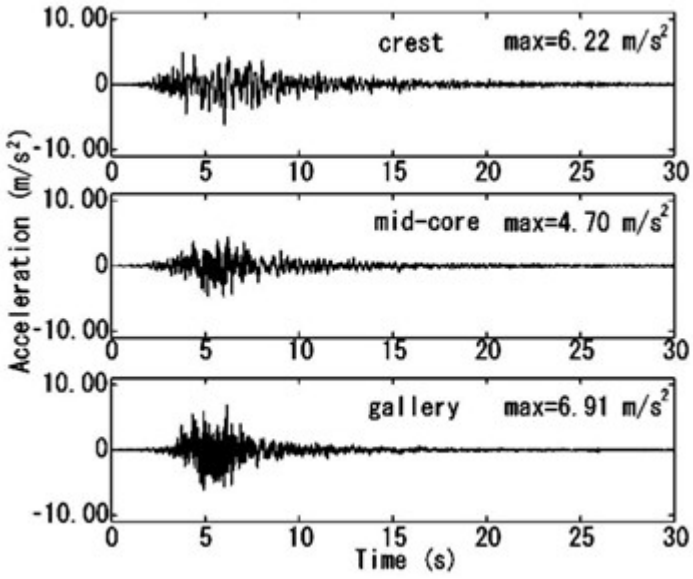
1.1.2 Description du séisme fort

Le séisme d'Iwate-Myiagi Nairiku d'une magnitude de 7.2 s'est produit à 8h43 le 14 juin 2008. Son épicentre se trouvait à environ 15km au nord du barrage d'Aratozawa (Figure 1.1.1-a) . Les accélérations du séisme de 2008 ont été enregistrées par trois accéléromètres situés en galerie, au centre et en crête du barrage (Figure 1.1.1-b). L'accélération maximale dans la direction amont-aval mesurée à la base du barrage (en galerie) atteint 10.24 m/s ^{2} tandis que celle mesurée en crête est désamplifiée d'un facteur deux, à 5.25 m/s ^{2} (Figure 1.1.2-a -a) , ce qui est inhabituellement important pour la réponse d'un barrage. Cet amortissement important laisse présager l'influence prépondérante des non linéarités du sol sur cette réponse. L'accélération maximale mesurée dans la direction verticale atteint 6.91 m/s ^{2} à la base du barrage (en galerie) et 6.22 m/s ^{2} en crête (Figure 1.1.2-a -b). Des fissures mineures sur le masque amont, et un tassement en crête de 19cm au niveau des parements, et d'environ 40cm au-dessus du noyau ont été observés [3].



(a)

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



(b)

Figure 1.1.2-a : (a) Accélérations horizontales à la base (gallery), au milieu du noyau et en crête ; (b) Accélérations verticales à la base (gallery), au milieu du noyau et en crête

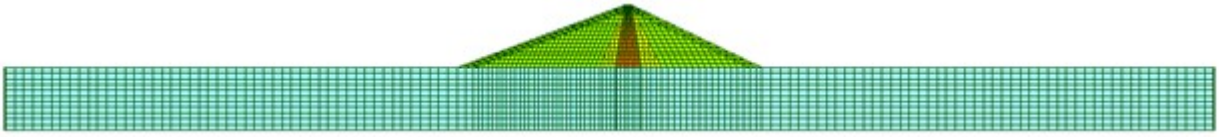
1.2 Description du maillage

Le maillage du barrage est bidimensionnel (déformation plane) et correspond à la plus grande section transversale, comme illustré sur la Figure 1.2-a . I l est constitué du barrage et d'une fondation. Les différentes zones du barrage sont modélisées, à savoir le noyau (orange foncé), les filtres (orange clair), les transitions (jaune) et les recharges (vert). L'extension horizontale de la fondation rocheuse est égale à deux fois son emprise à la base, et son extension verticale égale à une fois sa hauteur. Le maillage est de type quadratique : le nombre de mailles est de 3 003 , dont 2326 QUA8 et 38 TRIA6 et le nombre de nœuds de 7546.

Par simplification, seule deux matériaux sont considérés :

- Le matériau noyau est affecté aux zones de noyau et de filtres
- Le matériau recharge est affecté aux zones de transitions et de recharges

Leur comportement est modélisé par la loi constitutive de Hujeux, dont les paramètres ont été discutés précédemment dans les paragraphes § 1.4.1 . Les recharges étant supposées drainées, le couplage hydromécanique n'y est pas pris en compte. Cependant, la présence d'une retenue dans la recharge amont est tout de même modélisée en utilisant la masse du matériau déjaugée lors du calcul statique . Par contre, le couplage hydromécanique est pris en compte dans le noyau à l'aide d'un modèle parfaitement saturé. La présence d'air occlus sera modélisée en tenant compte des propriétés du fluide équivalent déterminées au paragraphe § 1.4.2 à l'aide du modèle de Boutonnier.



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

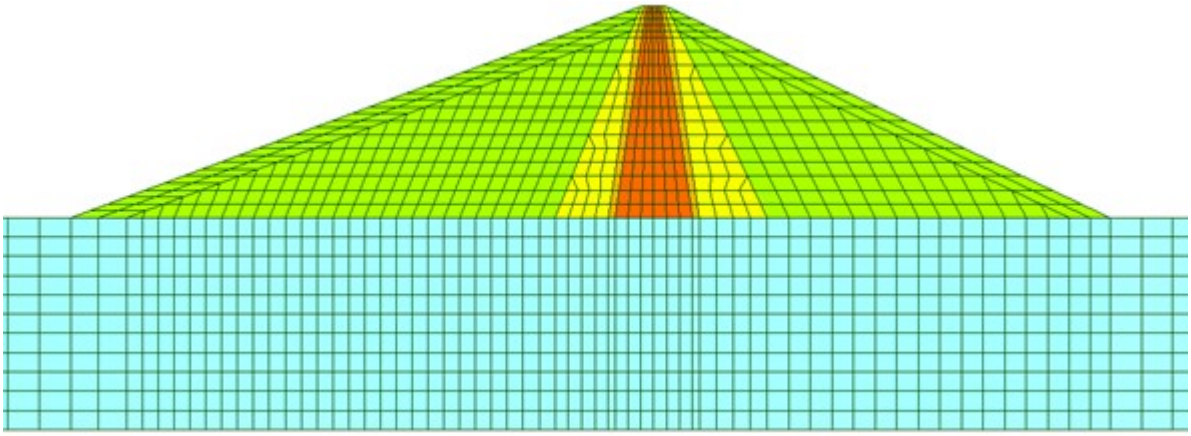


Figure 1.2-a : Maillage du barrage d'Aratozawa (en haut)

1.3 Modélisation

La modélisation est DPLAN_SI (plane sous-intégrée) dans les parements amont et aval, et DPLAN_HM_SI dans les filtres et le noyau, considérés comme formant le « noyau ». Pour tenir compte de la présence de la retenue à l'amont, la masse volumique déjaugée (tenant compte de la poussée d'Archimède) est utilisée pour le parement amont.

1.4 Propriétés des matériaux

1.4.1 Propriétés mécaniques

La fondation est considérée comme étant un matériau élastique linéaire infiniment rigide, dont les propriétés sont les suivantes :

- $E=143 GPa$
- $\nu=0.3$
- $\rho=2200 kg.m^{-3}$

Les valeurs des paramètres de la loi de Hujeux pour les parements et le noyau sont données dans le Tableau 1.4.1-1 ci-après. Le noyau est considéré comme étant un matériau de type sable (b=0,2) avec $C_c=0.11$ correspondant à 25% de fines. Le parement est rendu incompressible à l'amont $(\nu=0.45)$ et uniquement sous chargement isotrope $(\nu=0.3;\beta=200)$ à l'aval. Le profil de module d'Young dans les parements est ajusté suivant la relation donnée par Sawada [5] (Tableau 1.4.1-2 et Figure 1.4.2-a) de façon à obtenir une fréquence fondamentale de résonance f_0 du barrage comprise entre 2.86 Hz et 3.125 Hz.

Paramètres Hujeux	Enrochement	Noyau
$E[GPa]$	3.52	5.2
ν	0.3 − 0.45	0.36
$\rho_h[t.m^{-3}]$	2. 13 − 2.33	2.1
Porosité	0.2	0.36
n	0.4	0.7
β	200	32

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

$\lambda=\frac{e_0}{1+\beta}$	–	0.05
$C_c=\lambda\ln(10)$	–	0.11
d	3.5	2
b	0.6	0.2
$\phi[°]$	40	30
$\psi[°]$	30	30
f_0	224	200
$p'_{c0}=d\,p'_{crit0}[kPa]$	785	400
$p_{réf}[MPa]$	1	1
a_{mon}	0.03	0.001
a_{cyc}	10^{-5}	10^{-5}
c_{mon}	3.10^{-4}	0.01
c_{cyc}	3.10^{-4}	0.01
$r_d^{éla}$	0.01	0.05
$r_i^{éla}$	0.01	0.015
r_{hyst}	0.1	0.5
r_{mob}	0.9	0.9
x_m	2	1
r_d^{cyc}	0.01	0.05
r_i^{cyc}	0.01	0.015
α	1	1

Tableau 1.4.1-1 : Valeurs des paramètres de la loi Hujeux pour les enrochements et le noyau

<table>
<tr><th rowspan="2">Zone / Depth Z (m)</th><th colspan="2">Rock</th><th colspan="2">Core</th></tr>
<tr><th>Non-Saturated</th><th>Saturated</th><th>High</th><th>Low</th></tr>
<tr><td>0-5</td><td colspan="2">Vs = 245</td><td colspan="2">Vs = 210</td></tr>
<tr><td>5-30</td><td>Vs = 250 Z$^{0.20}$</td><td rowspan="2">Vs = 250 Z$^{0.20}$</td><td>Vs = 180 Z$^{0.35}$</td><td>Vs = 140 Z$^{0.34}$</td></tr>
<tr><td>30-</td><td>Vs = 200 Z$^{0.315}$</td><td>Vs = 180 Z$^{0.35}$</td><td>Vs = 140 Z$^{0.34}$</td></tr>
<tr><td>Poisson's Rato</td><td>ν = 0.375-0.006Z$^{0.58}$</td><td>ν = 0.49-0.00/Z$^{0.95}$</td><td colspan="2">ν = 0.45-0.006Z$^{0.60}$</td></tr>
</table>

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

Tableau 1.4.1-2 : Profils de vitesse des ondes de cisaillement et de coefficient de Poisson dans les parements (à gauche) et le noyau (à droite) du barrage d'Aratozawa, d'après Sawada [5]

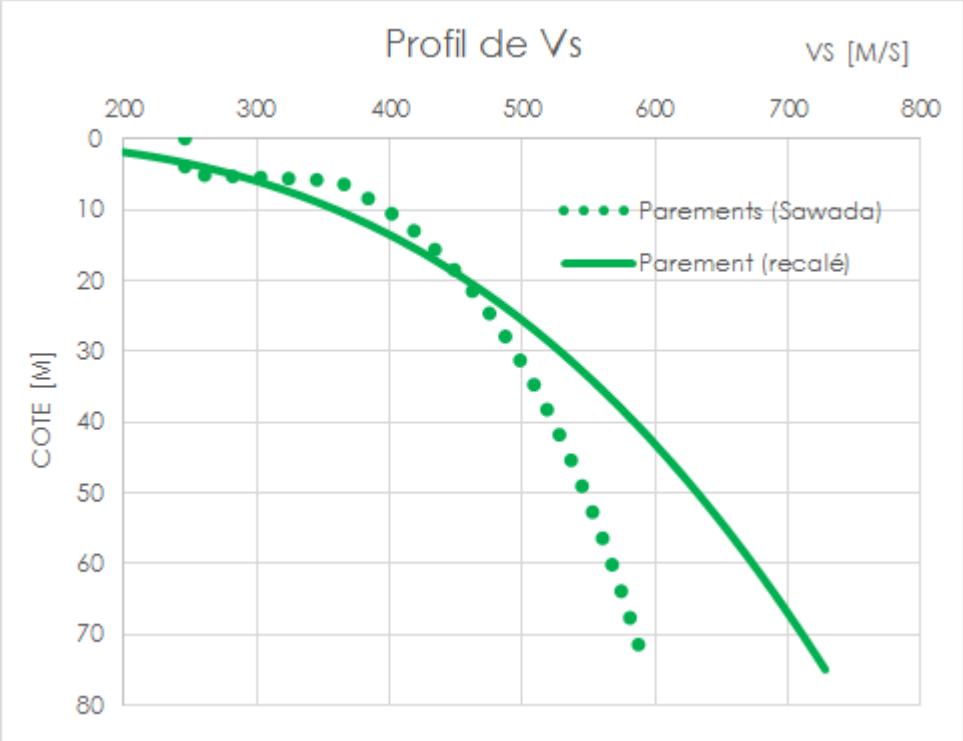


Figure 1.4.1-a : Profil de Vs dans les parements.
Le module de cisaillement G se déduit par la relation $G=\rho_h V_s^2$

Nota :

Les jeux de paramètres ECP, JEU2 et JEU3 proposés dans le fichier de commandes sont des jeux de paramètres alternatifs décrits dans le document [2].

1.4.2 Propriétés hydrauliques

Le parement aval est considéré comme sec. Le parement amont est considéré comme parfaitement drainé comparé au noyau. La ligne piézométrique est à la même cote que la retenue d'eau située à 10m sous la crête. Le corps du parement est ainsi traité en contraintes totales (modélisation purement mécanique `D_PLAN`) avec la masse volumique déjaugée.

Le noyau est considéré comme quasi-saturé. Le modèle de Boutonnier [1] est utilisé pour calculer la compressibilité du fluide équivalent constitué d'eau et de bulles d'air. L'évolution du module de compressibilité $K_w(u_w)$ en fonction de la pression interstitielle u_w (positive en compression) est illustrée sur la Figure 1.4.2-a. Les valeurs des paramètres hydrauliques du noyau sont données dans le Tableau 1.4.2-1. Par approximation, une valeur constante de module de compressibilité K_w est affectée à chaque couche de sol, calculée à partir de l'hypothèse d'un profil géostatique de pression hydraulique à la fin de la construction par couches, à savoir $\rho_w g[z_0 - z]$ où z_0 est la côte de la ligne d'eau supposée située en crête du barrage et [x] la partie positive de x.

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

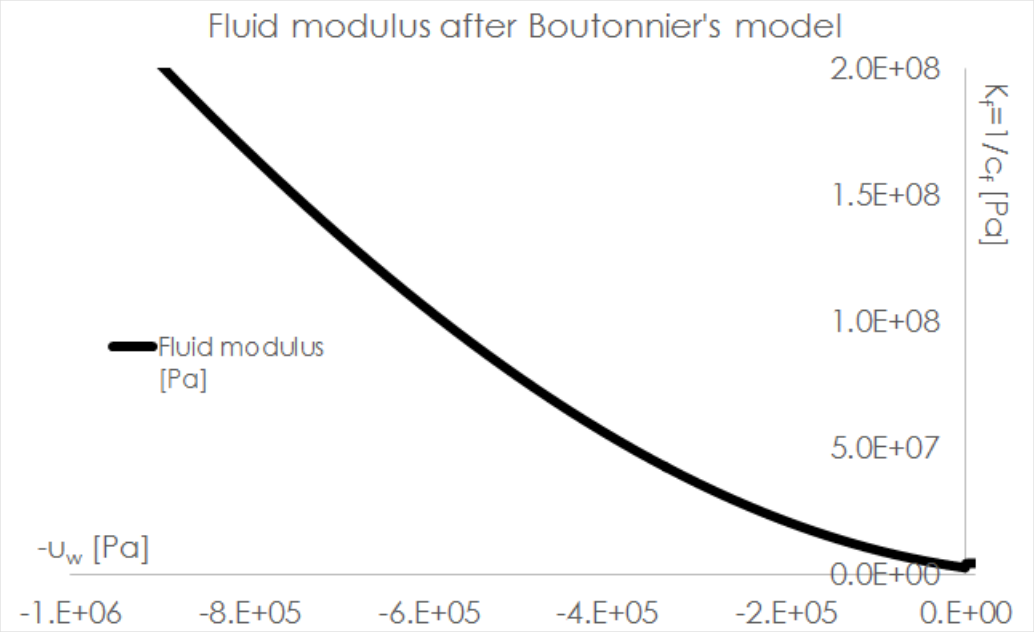


Figure 1.4.2-a : Module de compressibilité du fluide équivalent en fonction de la pression interstitielle, d'après le modèle de Boutonnier [1]

Paramètre	Valeur
Perméabilité [$m.s^{-1}$]	10^{-7}
Densité de l'eau [$kg.m^{-3}$]	1000
Coefficient de Biot	1
Viscosité v	10^{-3}
Dépendance de v par rapport à la température $\frac{dv}{dT}$	0

Tableau 1.4.2-1 : Valeurs des paramètres hydrauliques dans le noyau

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]. Par ailleurs, on en trouvera une description détaillée dans la note [2]. Dans ce qui suit, on ne mentionne que les informations les plus dignes d'intérêt selon nous.

1.5.1 Pour l'étape statique de construction par couches et mise en eau

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. Cela s'explique peut-être par la petitesse de zone concernée, à savoir le noyau dans lequel la modélisation est `DPLAN_HM_SI`. On retiendra donc cette solution plus économique en temps CPU.

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

Le barrage est divisé en 15 couches de sol, et la durée totale de construction par couches est de trois ans. 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 ;
- état de contraintes initiales effectives isotropes dans le noyau et les parements égal à $\sigma'_0=125\,kPa$. Cet état de contrainte correspond à la contrainte résiduelle après compactage des couches, estimé par la démarche proposée par Boutonnier [] ;
- Pour garantir la cohérence de l'état initial de contrainte avec la condition de pression libre, l'état initial de pression hydraulique est fixé à $PRE1=u_w=-115\,kPa$, de sorte que $P_{libre}=\sigma'_0+u_w$ dans le noyau ;
- application d'une pression hydraulique nulle $PRE1=0$ sur l'interface entre le noyau et le parement aval ;
- application d'une pression hydraulique $PRE1=u_w(z;t)=\rho_w g\left[z_0(t)-z\right]$ sur l'interface entre le noyau et le parement amont sous la forme d'une fonction du temps et de la côte $z_0(t)$ simulant la montée progressive de la retenue à l'amont. A l'étape de construction de chaque couche, on suppose que la nappe est située à la base de la couche en début d'étape, et à son sommet en fin d'étape ;

Enfin le chargement consiste en l'accélération de la pesanteur.

1.5.2 Pour l'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).

Enfin le signal sismique décrit au paragraphe § 1.1.2 est introduit sous la forme d'une onde plane de types P et SV d'incidence verticale à l'aide des éléments de frontière absorbante `DPLAN_ABSO` . Le signal se décline en deux chargements : l'accélération horizontale et l'accélération verticale, appliqués à la fois à la base de la fondation et sur les côtés. Sur les côtés, le chargement est celui du demi-espace homogène qu'on active en affectant une valeur non nulle au mot-clé :

```
DIST_REFLECHI = cote_de_la_surface_libre
```

1.6 Paramétrage du calcul

Le parallélisme MPI est utilisé avec 24 cœurs sur 4 nœuds de calcul. 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` = 5.10^{-4} pour les 8 premières couches et 10^{-3} pour les suivantes ;
- `ITER_GLOB_MAXI` = 10 pour les 8 premières couches et 20 pour les suivantes ;

Pour la loi Hujeux :

- `ALGO_INTE = SEMI_EXPLICITE`

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

- ITER_INTE_PAS = -2 pour les 8 premières couches et -4 pour les suivantes ;
- ITER_INTE_MAXI = -50 ;
- RESI_INTE_RELA = 10^{-8} ;

1.6.2 Pour le calcul dynamique

Par souci de limiter la durée du cas-test, on se restreint à 7 secondes de signal avec un pas de temps . Le schéma temporel utilisé est le schéma HHT avec MODI_EQUI = OUI et $\alpha = -0.3$. L'amortissement numérique correspondant est de 0.2 % à partir de 20 Hz.

Le paramétrage général est le suivant :

- SUBD_PAS = 2 ;
- SUBD_NIVEAU = 6 ;
- Solveur PETSC avec METHODE = NEWTON_KRYLOV ;
- RESI_GLOB_RELA = 5.10 $^{-4}$;
- ITER_GLOB_MAXI = 10 ;

Pour la loi Hujeux :

- ALGO_INTE = BASCULE _EXPLICITE
- ITER_INTE_PAS = -4 ;
- ITER_INTE_MAXI = -50 ;
- RESI_INTE_RELA = 10^{-2};

1.6.3 Redimensionnement du problème hydromécanique

Le redimensionnement hydromécanique est utilisé pour le calcul dynamique, avec les paramètres suivants :

$$P_0 = \frac{1}{K_0} = 10^{+4}$$

1.7 Résultats de référence

1.7.1 Données de référence

Les résultats de référence sont issus de mesures japonaises principalement données par Ohmachi []. Ils sont synthétisés dans le Tableau 1.7.1-1 en des points situés sur une coupe verticale le long du noyau (voir localisation sur la Figure 1.7.2-a)

	Sommet	Milieu (#23)	1/3 inférieur (#16)	Base (#2)
$max_{t\in[0;7]}\lvert a_x\rvert$	5.35 m/s^2	5.25 m/s^2	—	10.24 m/s ^{2}
$max_{t\in[0;7]}\lvert a_y\rvert$	4.70 m/s^2	6.22 m/s^2	—	6.91 m/s ^{2}
$u_y(t=7\,sec)$	39 cm	—	—	—
$moy_{t\in[4;7]}\Delta u_w$	—	150 – 180 kPa	250 – 310 kPa	400 – 410 kPa

Tableau 1.7.1-1 : Valeurs mesurées le long d'un profil vertical dans le noyau

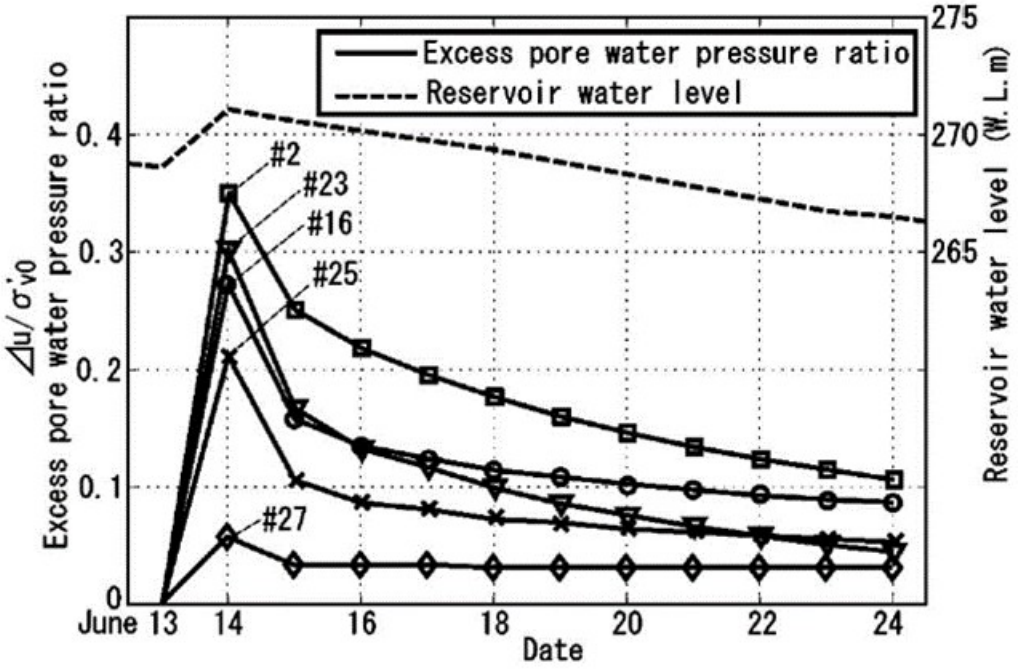
1.7.2 Tests de validation

Les tests sont les suivants :

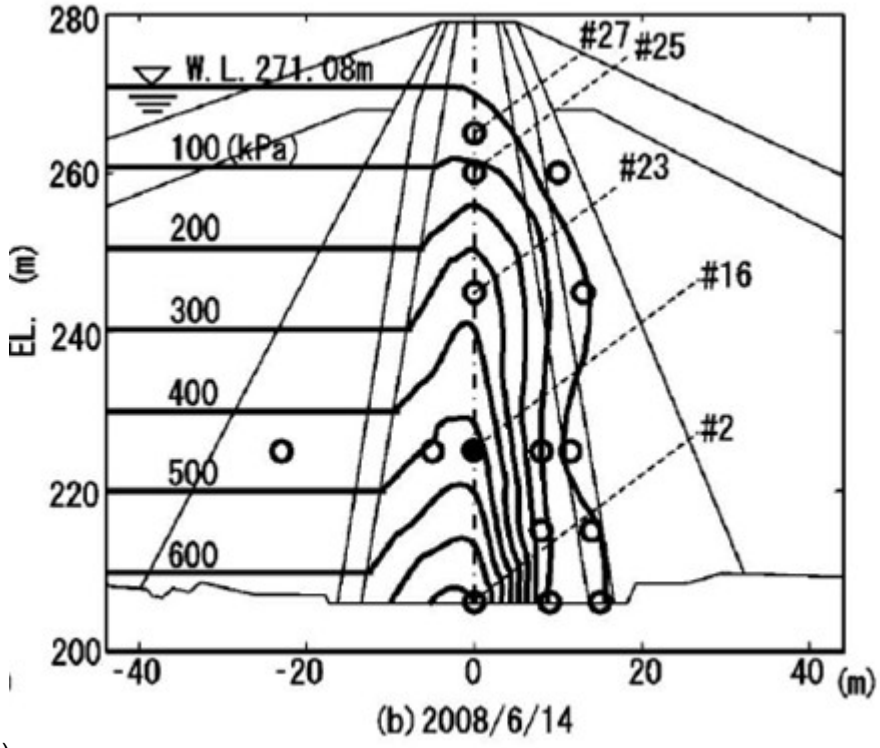
- 1 TEST_RESU porte sur la fréquence fondamentale de résonance du barrage après la phase statique ;

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

- 2 TEST_RESU portent sur les maxima d'accélération horizontale calculée au nœud sommet et au nœud milieu (#23) entre t=0 et t=7sec ;
- 2 TEST_RESU portent sur les maxima d'accélération verticale calculée au nœud sommet et au nœud milieu (#23) entre t=0 et t=7sec ;
- 1 TEST_RESU porte sur le tassement vertical calculé au nœud sommet à t=7sec ;
- Enfin, 2 TEST_RESU portent sur la moyenne de variation de la pression interstitielle calculée au nœud milieu (#23), au nœud situé au 1/3 inférieur (#16) et au nœud situé à la base (#2) entre t=4 et t=7sec ;



(a)



) (b)

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

Figure 1.7.2-a : Mesures d'augmentation de pression interstitielle après le séisme (au 14 juin 2008) : (a) en termes de Ru ; (b) en termes d'isovaleurs de pression interstitielle

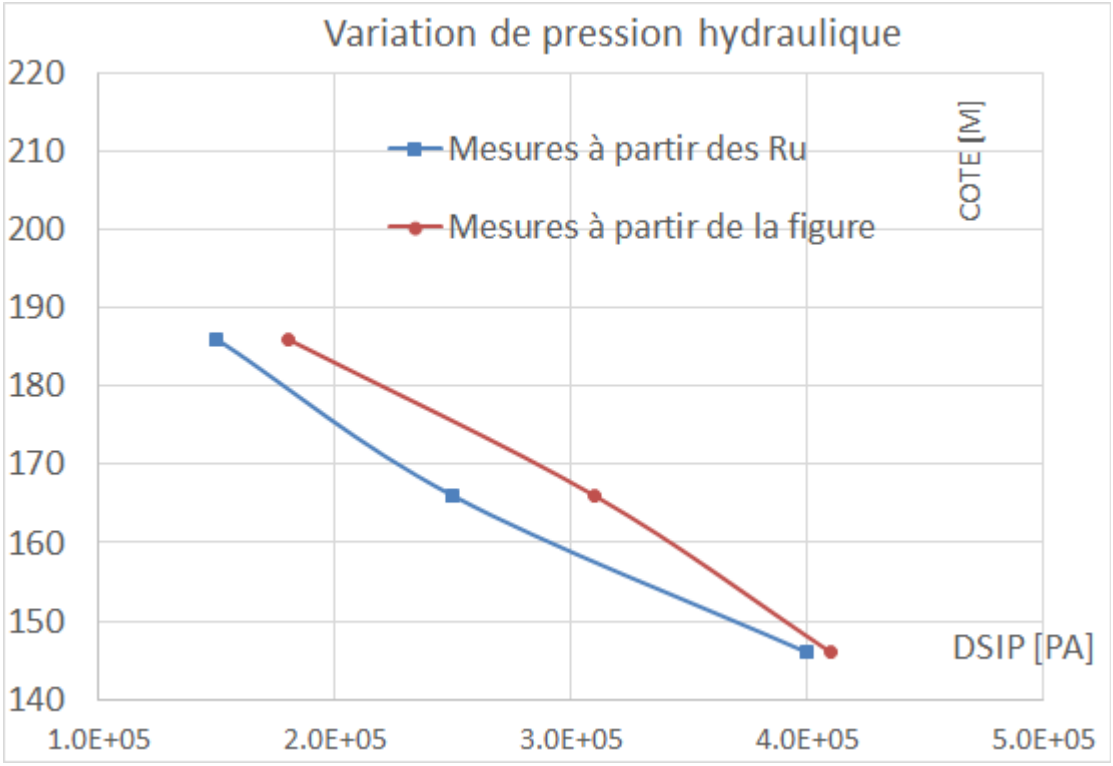


Figure 1.7.2-b : Augmentation de pression interstitielle après le séisme (au 14 juin 2008) calculée à partir de Ru et des isovaleurs de pression interstitielle de la Figure 1.7.2-a

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 (DPLAN_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 7 secondes suffisante pour le passage de la phase forte. Le pas de temps est de 0.004 secondes soit 1750 pas calculés et 875 pas archivés.

2.3 Fonctionnalités testées

Les nouveaux algorithmes de Hujeux sont testés :

- ALGO_INTE = SEMI_EXPLICITE pour l'étape 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

2.4.1 Fréquence fondamentale de résonance avant calcul dynamique

Identification	Référence	Tolérance
$f_0 \in [2.86 - 3.125]\, Hertz$	2.9 Hz	2%

Tableau 2.4.1-1

2.4.2 Valeurs de l'accélération maximale horizontale

Identification	Référence	Tolérance
Sommet	5.25 m/s^2	15%
#23	5.35 m/s^2	15%

Tableau 2.4.2-1

2.4.3 Valeurs de l'accélération maximale verticale

Identification	Référence	Tolérance
Sommet	6.22 m/s^2	40%
#23	4.70 m/s^2	30%

Tableau 2.4.3-1

2.4.4 Valeur du tassement en crête à t = 7 sec

Identification	Référence	Tolérance
Sommet	-0.39 m	50%

Tableau 2.4.4-1

2.4.5 Valeurs de pression interstitielle moyenne entre 4 et 7 sec

Identification	Référence	Tolérance
#23	400 kPa	5%
#16	310 kPa	5%
#2	165 kPa	5%

Tableau 2.4.5-1

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

3 Synthèse des résultats de la modélisation A

On représente dans les Figures 3-a à 3-b une comparaison par rapport à la solution de référence décrite au paragraphe **§1.7.1** les solutions calculées suivantes :

- profil de tassement à t = 7 sec le long d'une ligne verticale passant par le milieu du noyau (Figure 3-a) ;
- profil de pression interstitielle à t = 7 sec le long d'une ligne verticale passant par le milieu du noyau (Figure 3-b) ;

On peut constater que :

- le profil de tassement calculé ne coïncide pas avec celui mesuré. Cela laisse penser que les parements ne sont pas suffisamment rigides et qu'une meilleure calibration de la loi Hujeux est possible ;
- le profil d'augmentation des pressions hydrauliques dans le noyau est quant à lui excellent par rapport au fuseau des valeurs mesurées ;

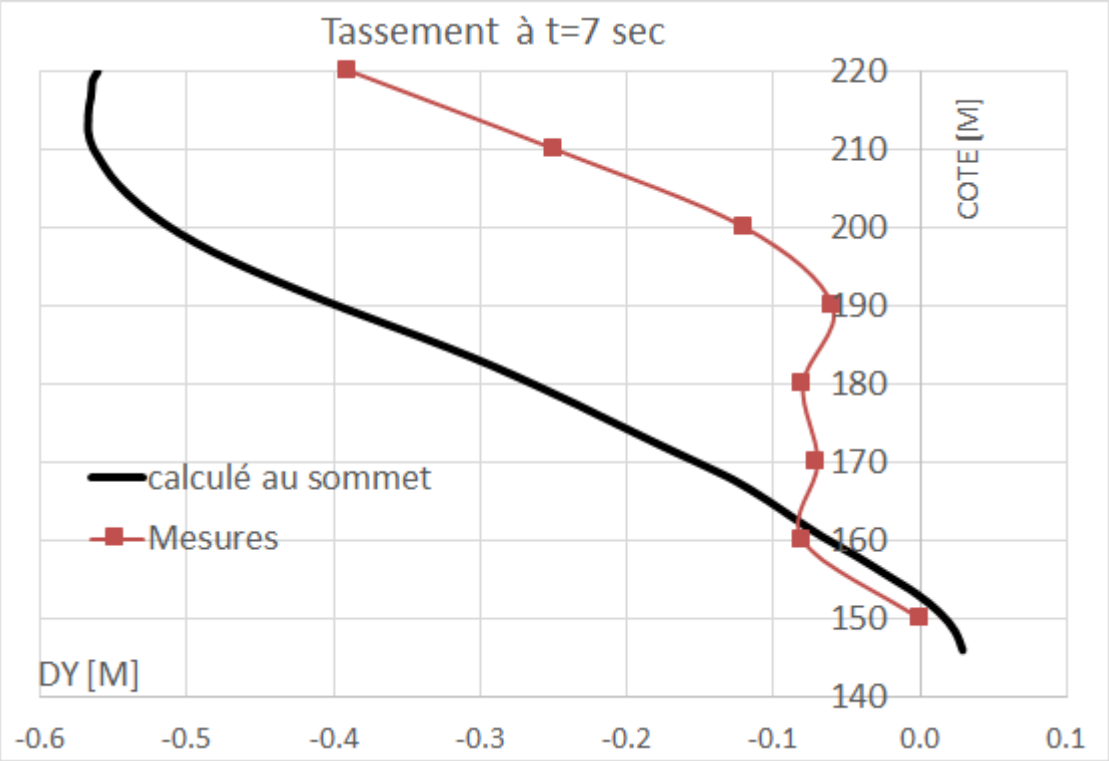


Figure 3-a : Profil de tassement Δu_y le long d'une coupe verticale du noyau à t = 7sec

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

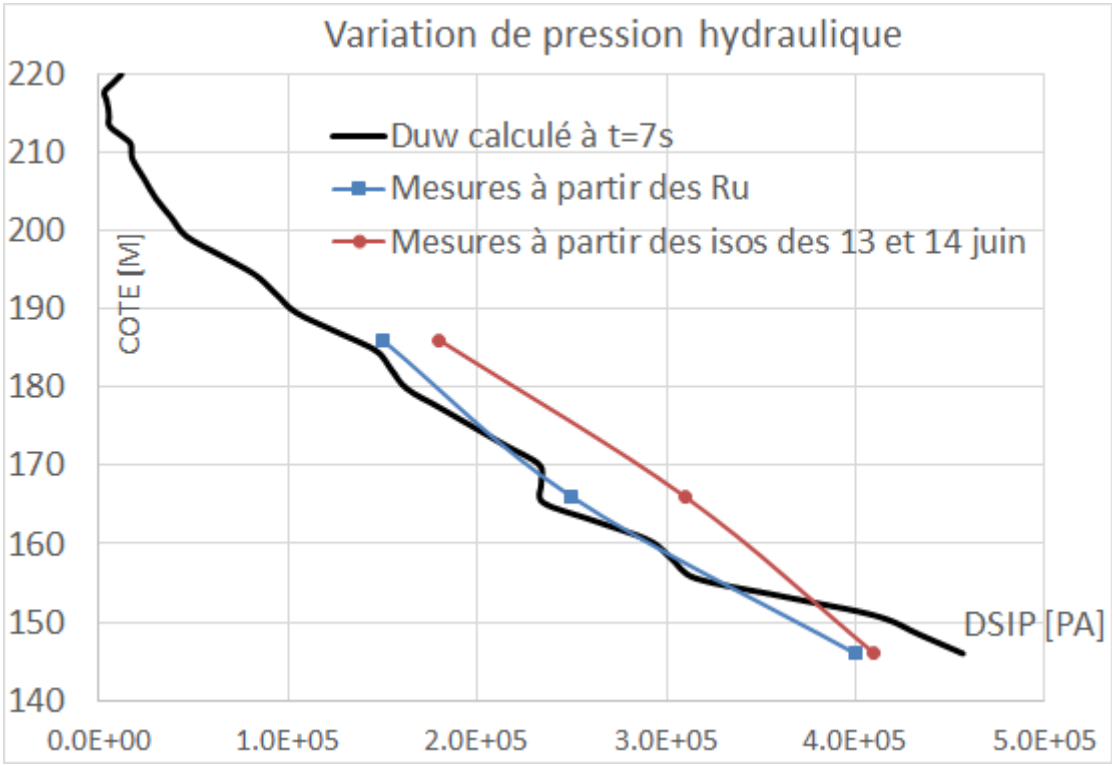


Figure 3-b : Profil de variation de pression interstitielle Δu_w le long d'une coupe verticale du noyau entre t = 0 et t = 7sec

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

4 Bibliographie

[1] Boutonnier L. "*Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation. Cas des ouvrages en terre : coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait/gonflement*", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007

[2] Kham M . " *Modélisation numérique du barrage en remblai d'Aratozawa sous excitation sismique* ", Note interne EDF R&D 6125-1714-2017-03830-FR, 2017

[3] Ohmachi T., Tahara T. "*Nonlinear earthquake response characteristics of a central clay core rockfill dam*", Soils and Foundations, vol.51, No.2, pp.227238, 2011

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

[5] Sawada Y., Takahashi T. "*study on the material properties and the earthquake behavior of rockfill dams*", Proceedings of 4th japan earthquake engineering symposium, pp.695702, 1975

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