

Fr-Jp : développement et validation d'une méthode simplifiée pour le calcul sismique des barrages en remblais

Fr-Jp : development and validation of a simplified method for the seismic analysis of embankment dam

Nicolas LEBRUN^{1*}, Moez JELLOULI², Astrid MONDOLONI¹

1 EDF CIH, La Motte-Cervolex, France

2 ISL Ingénierie, Paris, France

** nicolas-jean-claude.lebrun@edf.fr*

RESUME : L'arrêté du 6 août 2018 impose en France la justification des barrages existants et neufs en situation sismique notamment, et définit les obligations réglementaires associées. Le retour d'expérience accidentologique mondial montre que le risque de rupture des barrages en remblais concerne presque exclusivement les très forts séismes qui génèrent des pressions interstitielles dans les ouvrages mal conçus ou mal construits. Ce constat met en lumière l'intérêt du développement d'une méthode simplifiée, permettant de vérifier ces ouvrages en intégrant les phénomènes physiques principaux régissant leur comportement, tout en garantissant la mobilisation maîtrisée de ressources d'ingénierie. La méthode Fr-Jp est une méthode de calcul sismique non linéaire temporelle explicite applicable aux barrages en remblais. Elle permet d'intégrer un couplage mécanique/hydraulique et un endommagement en grands déplacements et peut être classée parmi les méthodes dynamiques simplifiées parce qu'elle ne nécessite pas de modélisation fine du barrage. Le calcul est par ailleurs quasi immédiat et ne demande pas de moyen numérique puissant. Son développement et sa validation a conduit à mettre en œuvre différentes actions : analyse d'une base de données de signaux sismiques mesurés sur des barrages japonais, développement d'un jumeau numérique pour la définition rapide des modes propres 3D, établissement d'une loi simplifiée dérivée de la méthode de Byrne pour le calcul des pressions interstitielles et confrontation à des données expérimentales. La validation de la méthode a enfin été complétée par la comparaison des résultats avec ceux obtenus par des modèles numériques. A l'issue de ses travaux, la méthode Fr-Jp constitue une approche validée de justification rapide des barrages en remblais soumis à un séisme, et permet d'adapter la complexité de la loi de mécanique des sols considérée pour la modélisation de leur comportement.

ABSTRACT: The French decree of 6 August 2018 requires both existing and new dams in France to be justified under seismic conditions, and defines the associated regulatory obligations. Global accident-based feedback shows that the failure risk of embankment dams is almost exclusively associated with very strong earthquakes that induce pore-pressure increment in inadequately designed or poorly constructed dams. This observation highlights the relevance of developing a simplified method that allows engineers to assess these structures while capturing the main physical mechanisms governing their behaviour, and while ensuring a controlled use of engineering resources. The Fr-Jp method is an explicit, transient dynamic, non-linear seismic analysis procedure applicable to embankment dams. It incorporates mechanical-hydraulic coupling and large-displacement, and can be classified among simplified dynamic methods because it does not require detailed modelling of the dam. Computation is essentially instantaneous and does not require significant computational power. Its development and validation involved several tasks: analysis of a database of seismic records measured on Japanese dams; development of a digital twin for rapid identification of three-dimensional natural modes; establishment of a simplified law derived from Byrne's method for pore-pressure estimation and comparison with experimental data. Method validation was further supported by comparison with results obtained from numerical models. As a result of this work, the Fr-Jp method provides a validated and rapid approach for the seismic justification of embankment dams, allowing the level of complexity of the soil-mechanics constitutive law to be adapted to the modelling requirements of the structure.

Mots-clés: barrage, séisme, liquéfaction, modélisation, Newmark.

1 INTRODUCTION

L'arrêté du 6 août 2018 impose en France la justification des barrages existants et neufs en situation sismique notamment, et définit les obligations réglementaires associées. Le retour d'expérience accidentologique mondial montre que le risque de rupture des barrages en remblais concerne presque exclusivement les très forts séismes qui génèrent des pressions interstitielles dans les ouvrages mal conçus ou mal construits. Ce constat met en lumière l'intérêt du développement d'une méthode simplifiée, permettant de vérifier ces ouvrages en intégrant les phénomènes physiques principaux régissant leur comportement, tout en garantissant la mobilisation maîtrisée de ressources d'ingénierie.

2 FONDEMENTS THEORIQUES DE LA METHODE

2.1 Comportement vibratoire de l'ouvrage

Développée afin de répondre à ce besoin, la méthode Fr-Jp est une méthode de calcul sismique non linéaire temporelle explicite, applicable aux barrages en remblais ou enrochements. Elle permet d'intégrer les effets 3D, un couplage mécanique/hydraulique et un endommagement en grands déplacements.

Le principe fondamental de la méthode Fr-Jp est de résoudre pour chaque pas de temps l'équation de la dynamique, projetée dans la base des modes propres de l'ouvrage. L'accélération horizontale totale en crête a_c est ensuite obtenue par combinaison des accélérations des différents modes propres :

$$a_c = \sum F P_i \times OSC(T_i, \xi_i) \quad (1)$$

$$T_i = A_i H / (G/\rho)^{0.5} \quad (2)$$

où $F P_i$ est le facteur de participation et $OSC(T_i, \xi_i)$ la solution de l'équation pour le mode i , de période propre T_i , d'amortissement ξ_i et de facteur de période A_i . H la hauteur de l'ouvrage, G son module de cisaillement et ρ son poids volumique.

Les déformations volumiques sont ensuite calculées par la relation suivante (Byrne, 1991) :

$$\Delta \varepsilon_v = C1. \gamma. \exp(-C2. \varepsilon_v / \gamma), \quad \gamma = (u_{\text{crête}} - u_{\text{base}}) / H \quad (3)$$

où $C1$ et $C2$ sont les paramètres de Byrne, et $u_{\text{crête}}$ et u_{base} obtenus par double intégration des accélérations.

A partir des déformations volumiques, l'incrément de pression interstitielle Δp est calculé :

$$\Delta p = M. \Delta \varepsilon_v \quad (4)$$

où M est un module, déterminé de la façon décrite plus loin dans l'article.

Enfin, le couplage hydraulique-mécanique est introduit par l'actualisation du module de cisaillement :

$$G = G[\gamma]. (1 - Cb \times \Delta p / \sigma'_0)^{0.5} \quad (5)$$

où Cb est un coefficient permettant la prise en compte du caractère non homogène de l'ouvrage.

2.2 Estimation des déplacements irréversibles

Les déplacements irréversibles sont décomposées en des déplacements provenant des déformations volumiques :

$$dH = H \times \varepsilon_v \quad (5)$$

et des déplacements liées au glissement d'une surface instable. Ces déplacements sont calculées par la méthode de Newmark (Newmark, 1965), à partir de l'accélération moyenne de la masse considérée par post-traitement du calcul principal en utilisant la déformée de chaque mode et de l'accélération critique, estimée par exemple par l'approche de l'équilibre limite et la méthode des tranches. L'accélération critique peut être définie en considérant une résistance de pic et résiduelle et pour une contrainte effective initiale ou annulée par la montée des pressions interstitielles.

3 DETERMINATION DES PARAMETRES DE LA METHODE

La méthodes Fr-Jp se voulant une approche simple et rapide à mettre en œuvre, un ensemble de développements a été réalisé afin de faciliter la détermination de ses paramètres d'entrée.

3.1 Evaluation simplifiée des facteurs de période et de participation 3D

Par défaut, la détermination des couples (A_i ; $F P_i$) pour les modes propres du barrages (3 premiers modes considérés dans la méthode) et des surfaces de glissements (5 types de surfaces considérés) nécessite la réalisation d'une analyse modale sur un modèle élastique 3D.

Afin de permettre la mise en œuvre rapide de la méthode Fr-Jp, une approche de détermination simplifiée de ses paramètres a été développées, par réalisation d'un jumeau numérique, établi à partir de simulations numériques correspondant à 700 géométries différentes (Jellouli, 2023).

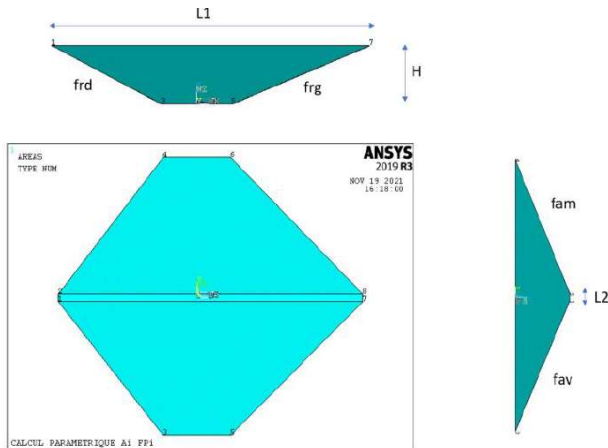


Figure 1. Géométrie simplifiée pour la définition analytique des (Ai ; FPi) (Jellouli, 2023)

Des formules analytiques ont ensuite été établies, afin d'estimer les paramètres des modes propres en fonction de la géométrie de l'ouvrage, puis intégrée à l'outil Fr-Jp. Par exemple pour le premier mode du barrage :

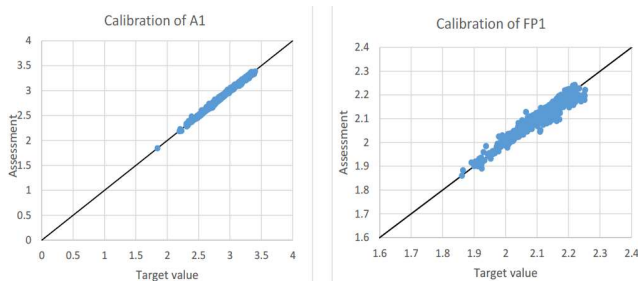


Figure 2. Comparaison des résultats des modèles numériques et des formules analytiques pour le premier mode (Jellouli, 2023)

De manière générale, la comparaison entre les résultats numériques et ceux donnés par les formules analytiques montrent de très bons résultats pour le premier mode et des écarts plus prononcés pour les modes 2 et 3. Néanmoins, l'incidence de ces écarts sur le résultat final reste limitée car le premier mode est de loin le mode dominant (Jellouli, 2023).

3.2 Détermination de la loi de calcul des montées des pressions interstitielles.

Selon l'équation (4) les pressions interstitielles sont calculées au moyen de l'introduction d'un module « M », non linéaire. Selon (Bhatia, 1982), ce module est le module de déchargement dynamique drainé du matériau, défini par le graphique ci-dessous :

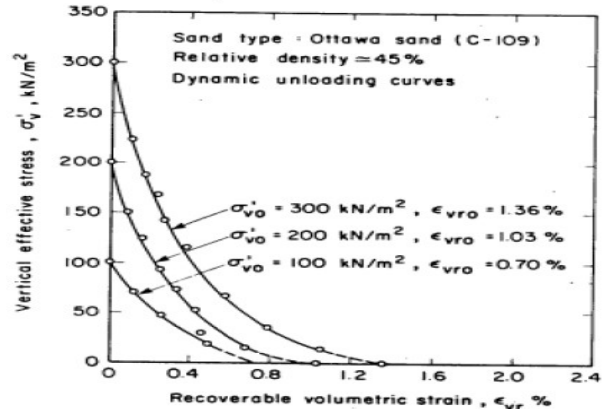


Figure 3. Courbe de déchargement dynamique pour 3 essais sur le sable d'Ottawa (Bhatia, 1982)

La fonction $M(\sigma', \sigma'_{v0}, \gamma_M, \epsilon_{vr0})$ est une fonction puissance où σ' est la contrainte effective, σ'_{v0} la contrainte effective verticale initiale, γ_M un coefficient de calage et ϵ_{vr0} la déformée volumique à la liquéfaction a été calée sur ces courbes.

La loi a ensuite été testée sur 8 essais triaxiaux cycliques réalisés historiquement sur des sables par EDF, en estimant la déformée volumique (non mesurée) par l'approche de Byrne (Byrne, 1991).

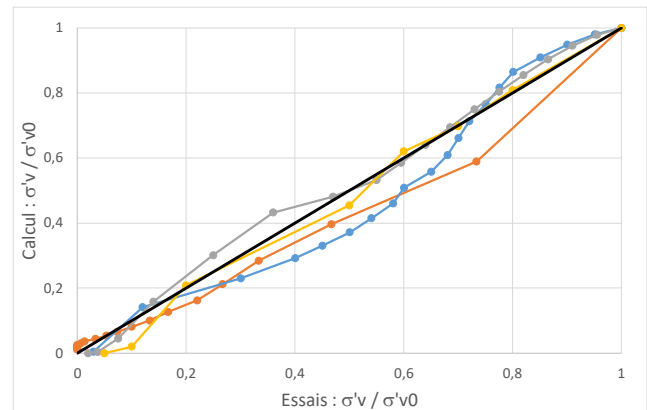


Figure 4. Comparaison des contraintes effectives normalisées mesurées et calculées au fil des cycles pour 4 essais

Pour les 8 essais, la relation entre le paramètre C1 de Byrne calé et la densité relative du matériau présente une bonne cohérence avec les valeurs recommandées par (Byrne 1991), ce qui permet de conforter le choix de la fonction retenue pour le module M sur d'autres matériaux que le sable d'Ottawa.

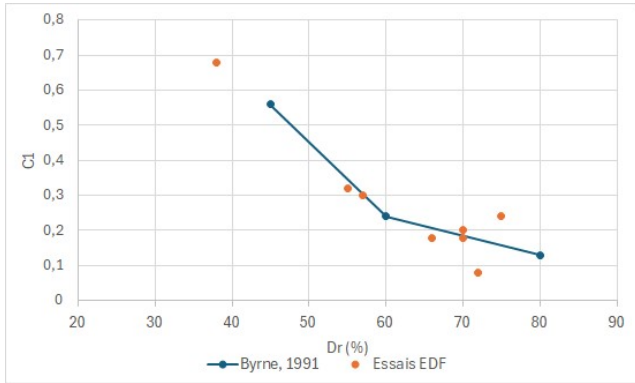


Figure 5. Comparaison des CI calés sur les données expérimentales avec les valeurs de (Byrne, 1991)

4 VALIDATION DE LA METHODE

L'objectif de la validation est de démontrer que la méthode de calcul permet bien de reproduire le comportement dynamique des barrages en remblais soumis au séisme.

4.1 Exploitation d'enregistrements sismiques sur des barrages

Cette première étape de validation concerne l'accélération calculée en crête de barrage. Elle est réalisée à partir de 30 couples d'enregistrements en crête et en pied sur des barrages japonais, soumis à un séisme. Les signaux expérimentaux et calculés par la méthode Fr-Jp sont comparés à travers les indicateurs d'Anderson (Anderson, 2004) C1 à C10 : durée d'arias, durée de phase forte, intensité d'arias, énergie totale, accélération max, vitesse max, déplacement max, spectre de réponse, spectre de Fourier, corrélation croisée. L'approche est également détaillée dans (Jellouli, 2023). La moyenne des paramètres est aussi calculée.

Dans un premier temps (E1), pour chaque cas analysé, le module élastique G_0 et un amortissement additionnel sont calés, afin de démontrer la capacité de la méthode à reproduire les signaux expérimentaux. Les courbes G/G_0 et $\xi(\gamma)$ suivantes sont considérées (Zhang, 2005) :

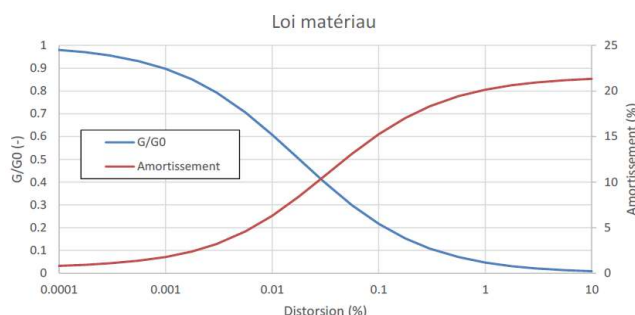


Figure 6. Courbes G/G_0 et $\xi(\gamma)$ utilisées par défaut dans l'outil Fr-Jp.

Dans un second temps (E2), les calculs sont réalisés avec des modules G_0 estimés automatiquement à partir d'une fonction $G_0 = f(H)$ définie par régression des valeurs de modules calées à l'étape 1 et avec un amortissement additionnel fixé à 2%.

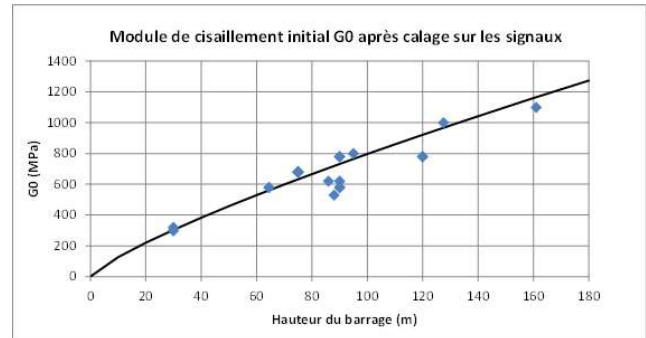


Figure 7. Fonction $G_0 = f(H)$ définie à partir des valeurs de calage

L'objectif de l'étape 2 est d'analyser la capacité de la méthode à calculer l'accélération en crête sans calage des paramètres. Les résultats obtenus sont synthétisés ci-après :

	Moyenne(C1;C10)			Moyenne(C1;C10)	
	E1	E2		E1	E2
Inamura1	8,4	4	Tataragi3	8,5	7,4
Iwaya1	8	6,9	Tataragi4	8,5	8,4
Kassa1	8,6	8,2	Tokuyama1	7,2	6,9
Kassa2	8,2	6,9	Aratozawa1	9,3	
Kassa3	8,4	7,3	Aratozawa2	8,7	8,3
Miho4	7,9	7,4	Aratozawa4	8,8	
Nishounai1	8,8	7,2	Aratozawa5	7,6	
Shichikashuku1	8,4	6,9	Aratozawa9	8,9	
Shichikashuku3	8,4	8,4	Aratozawa10	8,5	
Shimoyu1	8,4		Aratozawa13	7,9	
Tadami1	7,2	6,4	Aratozawa14	8,1	
Tadami2	8,4	8,1	Aratozawa15	9,1	9,1
Tadami3	8,3	8,3	Aratozawa17	8,7	7,5
Takami1	7,8	5,4	Aratozawa18	9,1	9,2
Takami2	8	4,2	Aratozawa19	9	9,2

Score	Verbal value
8-10	Excellent
6-8	Good
4-6	Fair
<4	Poor

Figure 8. Résultats des analyses des barrages japonais, valeur moyenne des indicateurs d'Anderson

Pour le barrage d'Aratozawa, le comportement semble influencé par les montées de pressions interstitielles, non prises en compte à ce stade, pour certains séismes. Ces cas ne sont donc pas étudiés à l'étape 2.

Pour l'étape 1, les résultats sont considérés comme très bons, à l'exception de l'indicateur C10 (déphasage). Cet indicateur n'est néanmoins pas considéré comme le plus important pour l'analyse simplifiée du comportement d'un barrage. Pour l'étape 2, les résultats restent de bonne qualité, à l'exception des cas pour lesquels les modules considérés diffèrent de plus de 10% de ceux estimés par calage à l'étape 1.

4.2 Comparaison à d'autres méthodes de calcul

Cette étape consiste en la comparaison des résultats obtenus par la méthode Fr-Jp avec ceux obtenus par les approches suivantes :

- Géostudio/Quake : linéaire équivalent + Newmark
- ASTER/IWAN : non linéaire + Newmark
- Seed&Makdisi (Makdisi, 1978) : pseudo-dynamique

Les méthodes Géostudio/Quake et Seed&Makdisi sont largement utilisées dans l'ingénierie des barrages en remblais. La méthode « IWAN » est une méthode dynamique transitoire non linéaire développée par EDF, implantée dans le logiciel éléments finis Code Aster. La loi du module de cisaillement considérée est de la forme suivante :

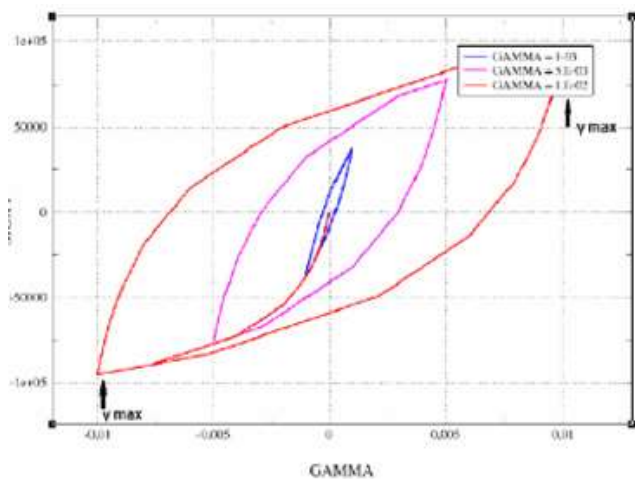


Figure 9. Forme de la loi du module de cisaillement utilisé par la méthode IWAN

La comparaison des différentes méthodes est faite pour deux modèles 2D d'ouvrages simplifiés ($H=60\text{m}$, fruit $3/2$, $\phi'=45^\circ$; $H=40\text{m}$, fruit $2/1$, $\phi'=35^\circ$), deux accélérogrammes calés respectivement à $0,3$ et $0,5\text{g}$ et 3 cercles de glissements correspondant respectivement à $1/5$, $3/5$ et $5/5$ de la hauteur de l'ouvrage depuis la crête. Les données de sortie analysées sont : la fréquence propre du premier mode élastique, l'accélération en crête et des cercles de glissement, les déplacements irréversibles des cercles de glissement.

Tableau 1. Fréquences du premier mode élastique (Hz)

Méthode	Modèle 1	Modèle 2
Vs/2,6H	3,4	4,2
Fr-Jp	2,9	3,6
S&M	2,6	4,0
IWAN	2,6	3,6

La méthode Géostudio/Quake ne permet pas de réaliser directement d'analyse modale. Pour les 3

autres méthodes, les fréquences calculées sont similaires et proches de la valeur théorique pour une section triangulaire. Pour la méthode IWAN, la fréquence légèrement plus basse peut s'expliquer par la nécessité de modélisation d'une fondation (prise très rigide) et pour la méthode Fr-Jp, par l'effet 3D (ouvrage considéré de grande largeur).

Les autres résultats sont présentés graphiquement pour le séisme calé à $0,5\text{g}$ et pour le modèle 1.

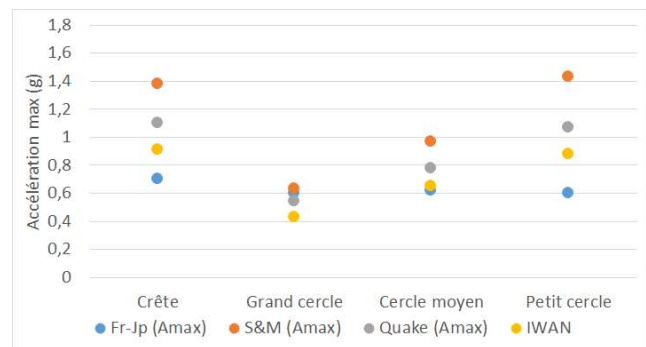


Figure 10. Comparaison des accélérations calculées pour le séisme calé à $0,5\text{g}$ et le modèle 1

De manière générale, pour l'ensemble des cas étudiés (modèles, séismes et localisations) les accélérations calculées par la méthode de Fr-Jp et les deux approches numériques par éléments finis donnent des résultats homogènes. L'écart-type sur la moyenne des 3 résultats varie entre 5 et 30%. La méthode de Seed&Makdisi donne en moyenne des résultats plus éloignés, avec des accélérations estimées régulièrement plus élevées.

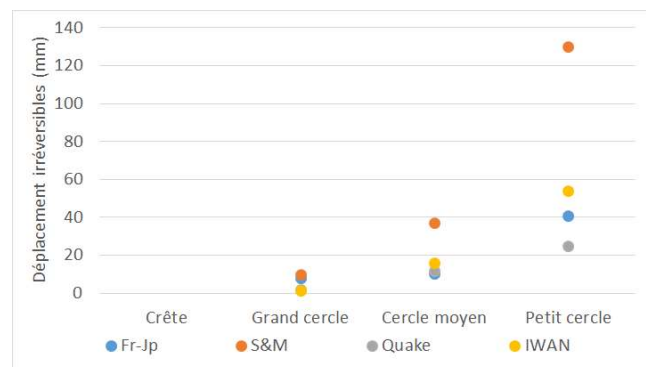


Figure 11. Comparaison des déplacements irréversibles pour le séisme calé à $0,5\text{g}$ et le modèle 1

De manière générale, pour l'ensemble des cas étudiés (modèles, séismes et localisations) les déplacements irréversibles calculés par la méthode de Fr-Jp et les deux approches numériques par éléments finis donnent des résultats plus dispersés. L'écart-type sur la moyenne des 3 résultats varie entre 20 et 100%. Les résultats varient généralement dans un rapport de 1 à 3, excepté dans certains cas, mais pour des

déplacements très faibles. La méthode de Seed&Makdisi donne en moyenne des résultats plus éloignés, avec des déplacements estimés régulièrement plus élevés.

Ces constats sont liés notamment au principe de la méthode de Newmark, dont les résultats sont, de manière générale, très dépendants des accélérations et des accélérations critiques calculées. En effet, les déplacements sont obtenus par double intégration des parties positives de la différence entre l'accélération et l'accélération critique en fonction du temps. Pour les modèles numériques maillés, il apparaît également que la méthode de Newmark peut nécessiter un raffinement important du maillage, notamment pour les petits cercles qui interceptent peu de mailles. Au-delà de ces considérations les écarts constatés sont considérés comme acceptables dans le cadre d'une approche simplifiée.

5 APPLICATION DE LA METHODE FR-JP AU BARRAGE D'ARATOZAWA

5.1 Présentation du barrage d'Aratozawa

Le barrage d'Aratozawa est un barrage en enrochements à noyau de 75m de haut, situé au Japon, qui a subi plusieurs séismes, dont le séisme d'Iwate-Miyagi Nairiku d'une magnitude 7,2 en 2008, ayant induit une accélération maximale horizontale amont-aval de 1,0g environ à la base de l'ouvrage.

Le fait de disposer d'accélérographes en crête et à la base de l'ouvrage pour ce séisme, mais également pour des séismes de faible magnitude, permet d'analyser la capacité de la méthode Fr-Jp dans le domaine quasi-élastique, ainsi que dans un domaine de déformations élevées, avec montées possibles de pressions interstitielles.

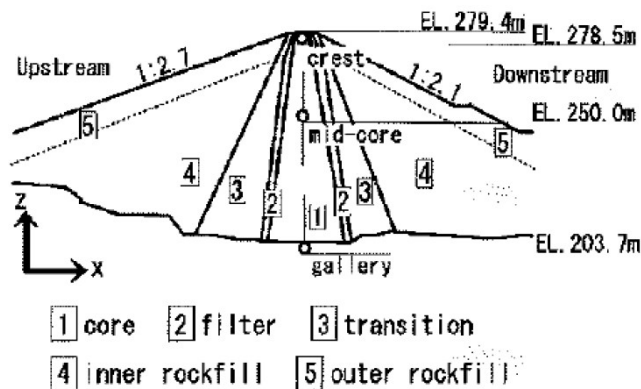


Figure 12. Coupe type du barrage d'Aratozawa

5.2 Comportement dans le domaine pseudo-élastique

Pour cette étude l'accélérogramme 15 (voir §4.1), correspondant au séisme du 14 juin 2008, est considéré, dont l'accélération maximale est de 0,024g. Pour la modélisation de l'ouvrage, l'ensemble des approches simplifiées permises par l'outil Fr-Jp est utilisé : calcul des $(A_i ; F_{Pi})$ par jumeau numérique, calcul de G_0 par la relation $G_0=f(H)$, prise en compte des courbes G/G_0 et $\xi(\gamma)$ de Zhang et amortissement supplémentaire forfaitaire de 2%.

Les spectres mesurés à la base (vert) et en crête (bleu) et calculé en crête (rouge) sont présentés ci-après.

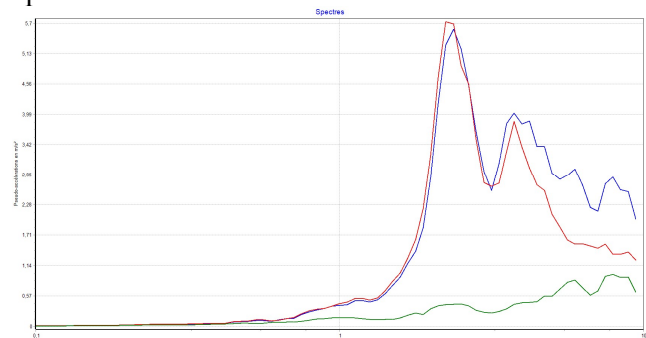


Figure 13. Spectre pour le barrage d'Aratozawa pour l'accélérogramme 15.

Les deux spectres en crête sont très similaires (jusqu'à 5h Hz), en particulier :

- L'accélération maximum calculée est de 0,11g contre 0,12g mesurée.
- La fréquence du premier mode propre calculée varie autour de 2,6Hz pendant la majeure partie du séisme pour une fréquence propre élastique estimée à 2,9 Hz (Ohmachi, 2011).

Le tassement volumique calculé est évidemment négligeable (<1cm) et la distorsion instantanée reste faible (de l'ordre de 10^{-4}).

5.3 Comportement pour le séisme de 2008

Pour la modélisation du comportement du barrage sous ce cas de charge, la montée des pressions interstitielles est prise en considération. La loi du module M calée par défaut sur les courbes de Bhatia est considérée. Le paramètre C1 de Byrne est fixé à 0,24 pour une densité relative moyenne (Byrne, 1991) et C2 est fixé à 0,6 (C1/0,4). Les résultats principaux suivants sont obtenus :

Tableau 2. Résultat du calcul du barrage d'Aratozawa pour le séisme de 2008

Paramètre	Fr-Jp	Mesure
Amax crête (g)	0,88	0,52
f_0 (Hz)	1,0-2,5	0,8-2,8

Tassement (cm)	9	40
Ru (%)	22	~30

Les données expérimentales sont issues de (Jellouli, 2015), (Yasudo, 2016) et (Ohmachi, 2011). Les intervalles de valeurs de f_0 correspondent aux variations temporelles de cette fréquence. Le tassement estimé par le calcul est purement volumique.

Si les résultats obtenus par le calcul sont moins proches des valeurs expérimentales qu'en ce qui concerne le comportement pseudo-élastique de l'ouvrage, la méthode Fr-Jp met bien en valeur les phénomènes qualitatifs suivants :

- atténuation de l'accélération maximale du signal sismique entre la base et la crête de l'ouvrage ;
- diminution de la fréquence du premier mode propre depuis 2,5Hz jusqu'à 1,0 0Hz environ ;
- montée significative des pressions interstitielles ;
- tassement décimétrique de la crête de l'ouvrage.

Si les écarts quantitatifs restent non négligeables pour certaines données de sortie, nous rappelons que ces résultats ont été obtenus avec la définition par défaut des paramètres de calcul. Par exemple, $\xi(g)$ considérée pour ce barrage par (Yasudo, 2016) correspond à un amortissement plus élevé que la courbe par défaut dans l'outil Fr-Jp. Sa prise en compte conduirait très probablement à diminuer l'accélération calculée en crête. De la même manière, il serait possible d'affiner la définition de l'ensemble des paramètres de calcul, mais dans tous les cas, il faut garder à l'esprit que la méthode Fr-Jp reste une approche simplifiée qui n'a pas vocation à retranscrire de manière très précise le comportement complexe d'un barrage en remblai, notamment en cas de fortes linéarités hétérogènes spatialement.

Par exemple, le tassement en crête est sous-estimé d'un rapport 4 environ. Cependant, selon (Tahara, 2015), ce tassement est la conséquence des effets combinés d'un tassement par écrouissage cyclique et d'un effet d'arc et croît de façon non linéaire avec la profondeur :

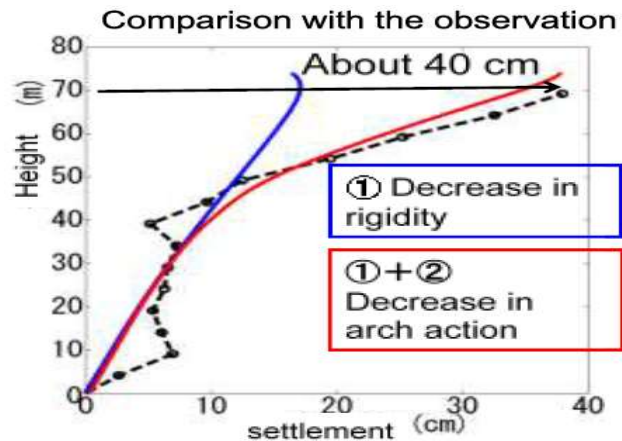


Figure 14. Tassement du barrage d'Aratozawa

La méthode Fr-Jp n'a pas vocation à pouvoir modéliser avec précision ce type de phénomène complexe.

6 CONCLUSIONS

La méthode Fr-Jp a été développée dans l'objectif de permettre l'étude des barrages en remblais, soumis à un séisme, avec des moyens d'ingénierie maîtrisés, tout en intégrant certains mécanismes physiques mis en jeu (effets 3D, couplage hydraulique/mécanique et comportement post-pic des matériaux). Elle permet des calculs rapides et des méthodes facilitant la définition de ses données d'entrée ont été établies. Les cas de validation réalisés ont montré sa bonne robustesse à reproduire le comportement d'un ouvrage alors que les non-linéarités de son comportement vibratoire restent modérées. En ce qui concerne l'estimation des déplacements de glissement irréversibles, elle présente les avantages et les limites des approches de Newmark.

Les analyses réalisées pour le barrage Aratozawa et le séisme de 2008 montrent par ailleurs, pour ce cas, sa capacité à retranscrire qualitativement le comportement de l'ouvrage alors que celui-ci montre de fortes non-linéarités, avec incidence sur son comportement vibratoire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anderson J.G. (2004). Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms. *13th World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings*.
- Bhatia S.K. (1982). *The verification of relationships for effective stress method to evaluate liquefaction potential of saturated sands*. Thèse au département de génie-civil de l'université de Colombie Britannique.
- Byrne P.M. (1991). A cyclic shear-volume coupling pore pressure model for sand. *Second International Conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*.
- Jellouli M. et al. (2015). Barrage en remblais : efficacité et limites des approches dynamiques simplifiées. *9ème colloque national AFPS*.
- Jellouli M. et al. (2023). Seismic analysis of old embankment dams: qualification of the Fr-Jp method. *12th ICOLD European Club Symposium*.
- Makdisi F.I et al. (1978). Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. *National science foundation, Journal of the geotechnical engineering division*.
- Newmark N.M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique 15(2)*.
- Ohmachi et al. (2011). Nonlinear earthquake response characteristics of a central clay core rockfill dam. *Soils and Foundations, vol.51, No.2*.
- Tahra et al. (2015). Analysis on wave propagation and settlement at the Aratozawa dam during the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, Japan. *Third CFBR/JCOLD seminar on seismic assessment, analysis and regulations of dams*.
- Yasuda et al. (2016). The reproduction analysis of Aratozawa dam during 2008 earthquake. *CFRB-JCOLD International symposium, qualification of dynamic analyses of dams and their equipments and of probabilistic assessment seismic hasard in Europe*.
- Zhang R.D. et al. (2005). Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 4*.