

PROPOSITION D'UN META-MODELE D'EVALUATION DES DEPLACEMENTS POST-SISMIQUES POUR LES RETENUES D'ALTITUDE DANS L'ARC ALPIN FRANCE-ITALIE

Proposal for a meta-model to assess post-seismic displacements for high-altitude reservoirs in the France-Italy Alps arch

Li-Hua LUU, Guillaume VEYLON

RECOVER, INRAE Aix-Marseille Université, 3275 Route de Cézanne, 13182 Aix-en-Provence, France

li-hua.luu@inrae.fr ; guillaume.veylon@inrae.fr

MOTS CLEFS

Retenue d'altitude, séisme, déplacement post-sismique, modélisation 2D, loi empirique

KEY WORDS

High-altitude reservoir, earthquake, post-seismic displacement, 2D modelling, empirical law

RÉSUMÉ

Les retenues de l'arc alpin franco-italien, zone cible de notre étude¹, sont constituées par des barrages en remblai situés en moyenne et haute montagne. Les volumes de stockage sont de l'ordre de quelques dizaines de milliers à quelques centaines de milliers de mètres cubes. Les conséquences d'une rupture de ces ouvrages, quelle que soit leur taille, seraient le plus souvent dévastatrices pour la sécurité publique.

Parmi les situations à examiner pour l'étude de la sûreté d'un barrage d'altitude, l'aléa sismique constitue une des justifications dimensionnantes. Nos travaux visent à fournir une méthode d'évaluation de la performance sismique d'un ouvrage ne nécessitant pas la mise en œuvre systématique de modélisations numériques élaborées, applicable notamment dans le cadre d'une EDD. Dans une étude antérieure, nous avons développé une méthode simplifiée pour calculer les déplacements induits par un tremblement de terre pour une géométrie de barrage simple [1]. La poursuite de ces travaux nous a permis d'établir une base de données pertinente à partir de modélisations numériques complexes basées sur la méthode des différences finies qui simulent la réponse post-sismique, dynamique et non-linéaire, d'une retenue d'altitude. A partir d'une modélisation 2D complète d'un barrage fondé sur un sol rocheux en pente et muni d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane, nous avons effectué une étude paramétrique en variant de manière aléatoire, dans la gamme d'intérêt, à la fois les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, les propriétés géomécaniques des matériaux et les paramètres des sollicitations sismiques en jeu. Nous avons ainsi établi une relation empirique qui prédit l'amplitude des dommages en fonction d'un nombre sans dimension comportant à la fois des informations sur les spécificités géotechniques de l'ouvrage et sur les caractéristiques des signaux sismiques d'entrées.

En particulier, le méta-modèle développé permet de calculer le tassement en crête d'une retenue d'altitude induit par un séisme dont les caractéristiques ont été fixées par la réglementation (ATB 2018). Au final, le respect de la revanche minimale pourra ainsi être vérifié. Dans la pratique, cette analyse sismique participe donc également à l'évaluation du risque de surverse post-sismique.

¹ Celle-ci a été initiée dans le cadre du projet européen RESBA - Programme opérationnel Italie - France (Alpes – ALCOTRA 2014-2020).

ABSTRACT

The reservoirs in the Franco-Italian Alps arch, the target area of our study, consist of embankment dams located at medium and high altitudes. Storage volumes range from a few tens of thousands to a few hundreds of thousands of cubic metres. The consequences of a failure in these structures, whatever their size, would most often be devastating for public safety.

Among the situations to be examined when studying the safety of a high-altitude dam, the seismic hazard is one of the dimensional justifications. The aim of our work is to provide a method for assessing the seismic performance of a structure that does not require the systematic use of elaborate numerical modelling, which can be applied in particular in the context of a dam hazard study. In a previous study, we developed a simplified method for calculating earthquake-induced displacements for a simple dam geometry [1]. The continuation of this work has enabled us to establish a relevant database from complex numerical modelling based on the finite difference method, which simulates the dynamic and non-linear post-seismic response of a high-altitude reservoir. Based on a complete 2D model of a dam founded on sloping rocky ground and fitted with a geomembrane sealing system, we carried out a parametric study by randomly varying, within the range of interest, the geometric characteristics of the structure, the geomechanical properties of the materials and the parameters of the seismic characteristics involved. We have thus established an empirical relationship that predicts the amplitude of damage as a function of a dimensionless number containing information on both the geotechnical characteristics of the structure and the characteristics of the input seismic signals.

In particular, the meta-model developed can be used to calculate the settlement at the crest of a high-altitude reservoir induced by an earthquake whose characteristics have been set by the regulations (ATB 2018). In practice, this seismic analysis therefore also helps to assess the risk of post-seismic overtopping.

1. INTRODUCTION

L'évaluation de la sûreté sismique des barrages en remblai peut s'effectuer par des modélisations numériques complexes basées sur les méthodes des éléments finis ou des différences finies [2]. En pratique, ces simulations exigent une forte expertise de l'ingénierie ainsi qu'une base de données d'entrée conséquente et de bonne qualité. Ces méthodes sont en cela inopérantes dans le cadre de diagnostic rapide ou lors des phases préliminaires de projets [3]. Il est également à noter que le retour d'expérience mondial indique que les accidents de barrages liés à des séismes sont rares [4]. Concernant les barrages en remblai en particulier, le seul cas d'endommagements ayant occasionné des victimes est celui du petit barrage de Fujinuma au Japon lors du séisme de Tohoku en 2011. Ainsi, dans le cadre des analyses de risque pratiquées dans les EDD, des méthodologies dites simplifiées nécessitant peu d'efforts de calculs, ont été développées pour évaluer la réponse sismique d'un barrage par des approches pseudo-statiques [5] ou dynamiques découplées [6, 7]. Ces méthodes simplifiées, aujourd'hui applicables aux ouvrages en remblai, ont été établies dans des contextes sismiques très différents, pour des configurations géotechniques très variées, pour des ouvrages ayant des caractéristiques géométriques et géotechniques souvent éloignées de celle des barrages en remblai alpins. La présente étude vise à fournir à l'ingénierie une méthode de pré-diagnostic de la performance sismique d'un ouvrage ne nécessitant pas la mise en œuvre de modélisations numériques spécifiques. L'objectif cible de ces travaux est d'abord le développement d'un outil opérationnel pour la justification préliminaire d'un projet ou le diagnostic rapide d'un ouvrage existant vis-à-vis de l'aléa sismique dans l'arc alpin franco-italien.

1.1. Retenues d'altitude

1.1.1. Géométrie et matériaux

Installées dans des zones montagneuses, les retenues d'altitude sont construites par excavation et fondées le plus souvent sur des massifs rocheux en pente. Dans les Alpes, ces ouvrages sont constitués de moraines ou de schistes, et dans une moindre mesure, de limons ou matériaux obtenus par concassage de roches sédimentaires (calcaires, grès, marnes), magmatiques (basalte, granite) ou encore de roches métamorphiques (gneiss). Le volume de stockage de ces réservoirs de montagne varie d'une dizaine à plusieurs centaines de milliers de mètres cube. Leur géométrie typique se caractérise par un trapèze en coupe transversale, une crête de quelques mètres

de largeur, une hauteur variant de 10 à 20 mètres, et une pente allant de 1/2 à 1/3 (cf. Fig. 1). Les paramètres géotechniques communément rencontrés dans de telles structures hydrauliques ont été répertoriés dans le guide Retenue d'altitudes [8] (cf. § 1.2).



Figure 1 : Retenue d'altitude située dans les Alpes françaises.

1.1.2. Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG)

L'enquête de terrain conduite avec les partenaires italiens du projet RESBA et les gestionnaires d'ouvrage fait apparaître que les dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG) en PVC sont la solution d'étanchéement la plus souvent mise en œuvre dans les retenues valdôtaines et piémontaises. Les DEG se composent généralement de trois couches distinctes : la structure support, la structure d'étanchéité et la structure de recouvrement. La structure entre la géomembrane et les matériaux de recouvrement est pratiquement toujours la même : elle est généralement constituée d'un géotextile de protection de 700 à 1200 g/m², associé ou non à un système d'accroche des terres.

1.1.3. Aléa sismique

Le zonage sismique en vigueur en France fournit une appréciation de l'aléa sismique sur le territoire national. Les communes du territoire français sont réparties en cinq zones de sismicité : très faible, faible, modérée, moyenne, forte. On constate sur la figure 2 que la zone frontalière franco-italienne est parmi les zones les plus sismiques du territoire métropolitain français (essentiellement zone de sismicité moyenne).

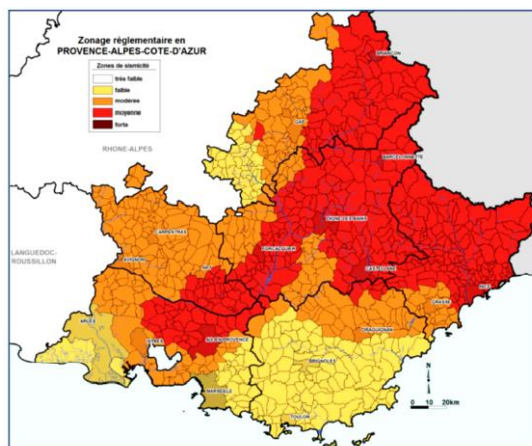


Fig. 2 : Zonage sismique de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur

Dans la suite de l'étude, nous avons utilisé le logiciel *SeismoMatch* (Seismosoft, 2018), qui se base sur un algorithme d'ajout d'ondelettes pour générer des accélérogrammes synthétiques à partir d'enregistrements existants respectant les spectres de réponse réglementaires selon l'approche proposée par Van Marcke *et al.* [9] (cf. § 1.2).

1.2. Modélisation numérique

Notre étude met en œuvre des simulations dynamiques non-linéaires couplées à l'aide du logiciel de calculs aux différences finies FLAC (Itasca) pour une modélisation complète d'une retenue d'altitude fondée sur un sol rocheux en pente et munie d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (élément linéique en 2D). La modélisation d'un séisme sous FLAC s'effectue par l'implémentation d'un chargement en contraintes appliqué à la base du modèle.

La figure 3 représente le modèle d'une retenue d'altitude constituée d'un remblai sur une fondation rocheuse pentue et d'un DEG surmonté d'un rip-rap. Le barrage est modélisé par une section trapézoïdale avec une crête de 4 mètres de largeur. La hauteur H amont varie entre 10 et 20 mètres, la pente en aval entre 1/2 et 1/3, et la pente aval du terrain entre 0 et 1/6. Le rip-rap a une largeur de 0.5 mètre et son ancrage est situé à 1 mètre sous la crête.

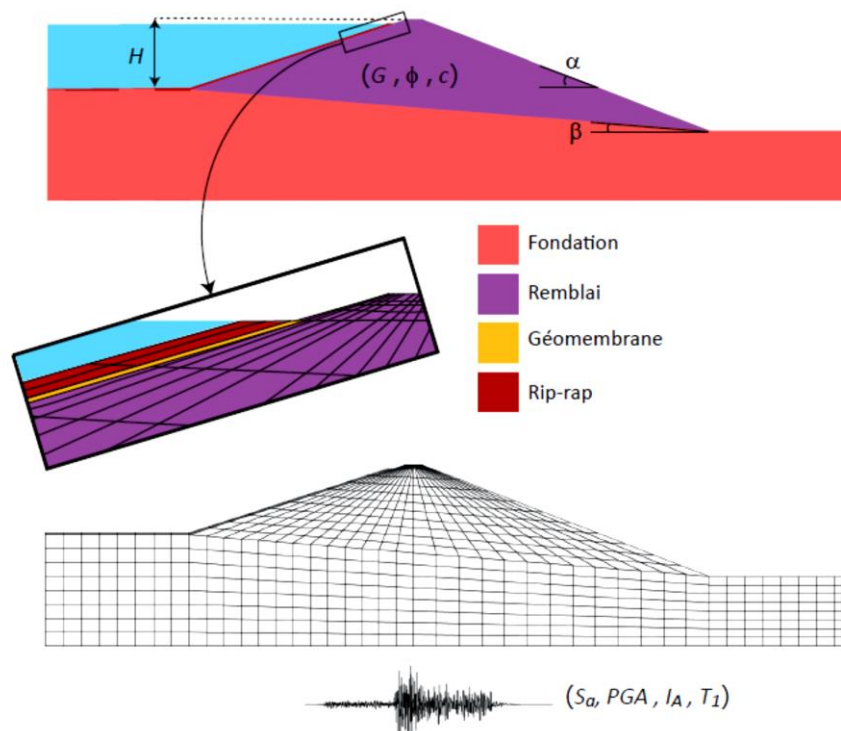


Fig. 3 : Modèle FLAC 2D d'une retenue d'altitude type incluant un dispositif d'étanchéité (géomembrane et rip-rap).

Les masses volumiques sont prises égales à 2.35, 2.15 et 2.70 t/m³, pour le barrage, le rip-rap et la fondation respectivement. Le coefficient de Poisson est égal à 0.35 pour le barrage et le rip-rap, et à 0.2 pour la fondation. Les valeurs du module élastique G vont de 180 MPa à 480 MPa pour le barrage, de 150 MPa à 200 MPa pour le rip-rap, et fixé à 12.5 GPa pour la fondation. La cohésion c varie de 0 à 10 kPa pour le barrage, alors qu'elle est nulle pour le rip-rap, et égale à 5 MPa pour la fondation. Les valeurs de l'angle de frottement ϕ varient de 30° à 37° pour le barrage, et fixées à 35° pour le rip-rap et la fondation. Enfin, sur la base d'un travail précédent [10] nous modélisons la géomembrane comme une interface en utilisant le modèle Mohr-Coulomb avec les paramètres suivants : une résistance au cisaillement égale à 10 MPa, une résistance normale de résistance à 0.6 MPa, un angle de frottement de 22°, et une cohésion nulle.

Comme évoqué précédemment (cf. §1.1.3), nous avons généré des accélérogrammes d'étude à partir des spectres cibles réglementaires correspondant au contexte sismique alpin franco-italien, à savoir un sol de classe A, les zones de sismicité 3 et 4 pour des barrages de classe A, B et C (cf. Fig. 4).

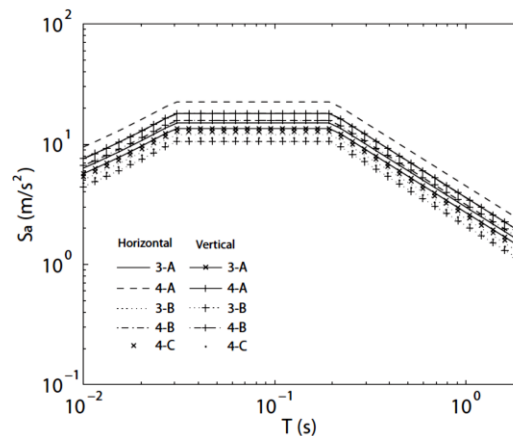


Fig. 4 : Spectres de réponse réglementaires (Arrêté du 6 août 2018).

L'utilisation du logiciel *SeismoMatch* a permis d'ajuster des enregistrements réels de tremblements de terre afin de les faire correspondre aux spécificités des spectres cibles via un algorithme utilisant l'ajout d'ondelettes. Le tableau ci-dessous présente les différentes caractéristiques sismiques des 5 synthétiques accélérogrammes mis en œuvre dans nos simulations : l'accélération maximale au rocher (*PGA*), l'intensité Arias (*I_A*), la durée significative (*τ*), la vitesse maximale (*V_m*), l'accélération efficace (*A_{eff}*) et l'accélération contenant 95% de l'intensité Arias *A₉₅* :

N°	Zone-Class	<i>PGA</i> (m/s²)	<i>I_A</i> (m/s)	<i>τ</i> (s)	<i>V_m</i> (m/s)	<i>A_{eff}</i> (m/s²)	<i>A₉₅</i> (m/s²)
		hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.	hor./ver.
1	3-A	0.22/0.23	0.28/ 0.72	12.50/17.95	0.04/0.10	0.14/ 0.17	0.22/ 0.23
2	4-A	0.34/0.31	0.61/1.33	19.79/16.05	0.15/0.18	0.25/0.24	0.33/0.31
3	3-B	0.16/0.18	0.19/0.44	20.03/18.19	0.07/0.09	0.11/0.15	0.16/0.18
4	4-B	0.27/0.27	0.40/0.98	15.23/15.46	0.09/0.14	0.21/0.21	0.27/0.26
5	4-C	0.19/0.19	0.20/0.50	15.79/14.00	0.06/0.09	0.13/0.15	0.19/0.19

Table 1 : Caractéristiques sismiques des accélérogrammes étudiés.

2. DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC

2.1. Comparaison du méta-modèle avec un modèle existant

Dans une étude antérieure (Veylon *et al.*, 2017 [1]), nous avons développé une méthode simplifiée pour évaluer les performances sismiques des grands réservoirs de montagne. Nous proposons de valider notre présente modélisation en comparant nos résultats de simulation à ceux obtenus par l'étude précédente décrite ci-après.

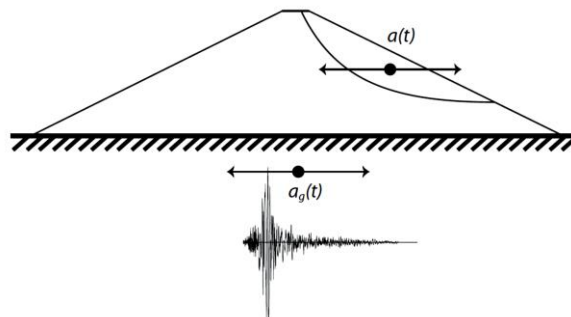


Fig. 5 : Méthode des blocs de Newmark

Il s'agit d'une méthode simplifiée basée sur l'analyse de Newmark, qui consiste à considérer la rupture d'un bloc glissant comme schématisé sur la figure 5. Pour un bloc donné, la première étape de ce modèle consiste à déterminer l'accélération critique *k_y*, la valeur de l'accélération horizontale menant le bloc à son équilibre limite.

Les effets des actions déstabilisatrices, la gravité et le chargement sismique, sont égales aux forces de résistance de la résistance au cisaillement mobilisée le long de la surface de glissement. La résistance au cisaillement le long de la surface de rupture est supposée être délimitée par un critère de Mohr-Coulomb. Lors d'un tremblement de terre, le bloc commence à glisser si l'accélération du bloc dépasse k_y . Le glissement continue jusqu'à ce que la vitesse relative entre le bloc et sa base atteigne zéro. La double intégration dans le temps de l'accélération dépassant k_y donne le déplacement cumulé d'un bloc. Le déplacement permanent du bloc ainsi déterminé par l'analyse de Newmark constitue un indice de performance sismique. Cette méthode simplifiée a fait l'objet d'une étude paramétrique (7 accélérogrammes appliqués à 33 configurations géotechniques) permettant d'estimer l'influence des géométries des remblais et des propriétés mécaniques sur la prédiction des effets induits par les tremblements de terre [1].

Dans la présente étude numérique, à la différence de la méthode simplifiée, l'indice de performance sismique n'est plus déterminé à partir de blocs prédéfinis, mais calculé par une simulation complexe du déplacement induit. Pour la configuration considérée, les déplacements horizontaux du parement aval s'étendent de 0.1 à 0.7 m. L'indice de performance est estimé par le cercle de glissement prédominant, à savoir $U=0.3$ m. Sur la figure 6, nous pouvons constater l'accord satisfaisant entre ce résultat et les estimations obtenues par Veylon *et al.* [1].

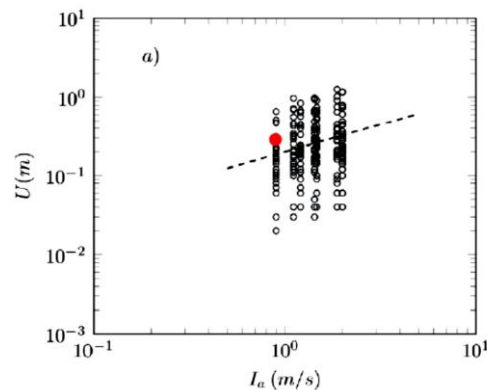


Fig. 6 : Déplacements post-sismiques estimés par la méthode simplifiée [1] (en noir) et par la simulation FLAC 2D (en rouge).

2.2. Etude paramétrique

L'objectif de nos travaux est l'établissement d'une loi pseudo-empirique qui permette d'évaluer l'amplitude des dommages sismiques à partir de données d'entrée accessibles. Pour cela, à partir du modèle numérique implémenté sous FLAC, nous avons effectué une étude paramétrique en variant les paramètres spécifiques aux barrages en remblai alpins et aux sollicitations sismiques en jeu dans la gamme des valeurs représentatives (cf. §1.2).

2.2.1. Analyse statistique

Pour proposer une analyse statistique des performances sismiques des ouvrages, nous avons parcouru la gamme pertinente de paramètres géométriques et géotechniques de manière aléatoire uniforme. Chaque structure hydraulique ainsi générée par tirage au sort (cf. Fig. 7), est alors soumise aux 5 accélérogrammes d'étude données dans la Table 1.

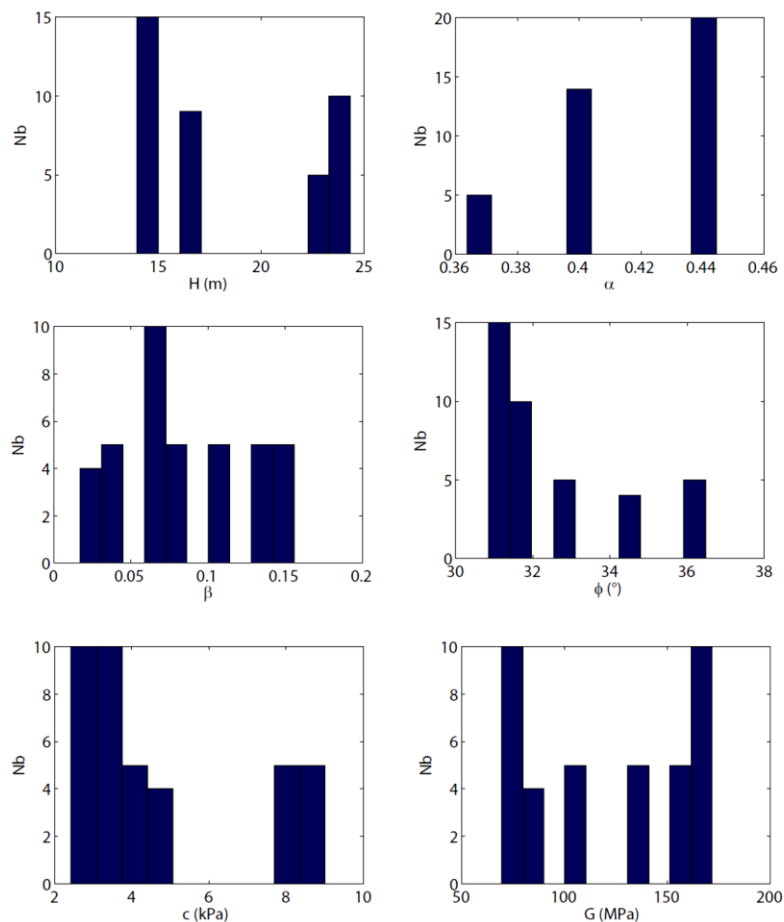


Fig. 7 : Histogrammes des paramètres géométriques et géomécaniques tirés au hasard.

2.2.2. Indices de performance sismique

Une des avancées notables apportée par la modélisation sous *FLAC* par rapport à la méthode simplifiée de type Newmark [1] est une prédiction spatiale effective des dommages sismiques, et non une estimation par déplacements de blocs. Nous avons accès à la fois aux déplacements horizontaux et aux tassements verticaux permanents. Ainsi à partir des simulations, nous déterminons 6 valeurs de déplacements induits par la sollicitation sismique. Comme indiqué sur l'exemple de la figure 8, nous considérons les indices de performance suivants dans la suite de l'étude : le déplacement maximum horizontal X_{max} , les tassements du rip-rap Y_{rr} , en amont Y_{am} , en aval Y_{av} et à la crête Y_{cr} et la déformation maximale de la géomembrane ϵ_{gm} .

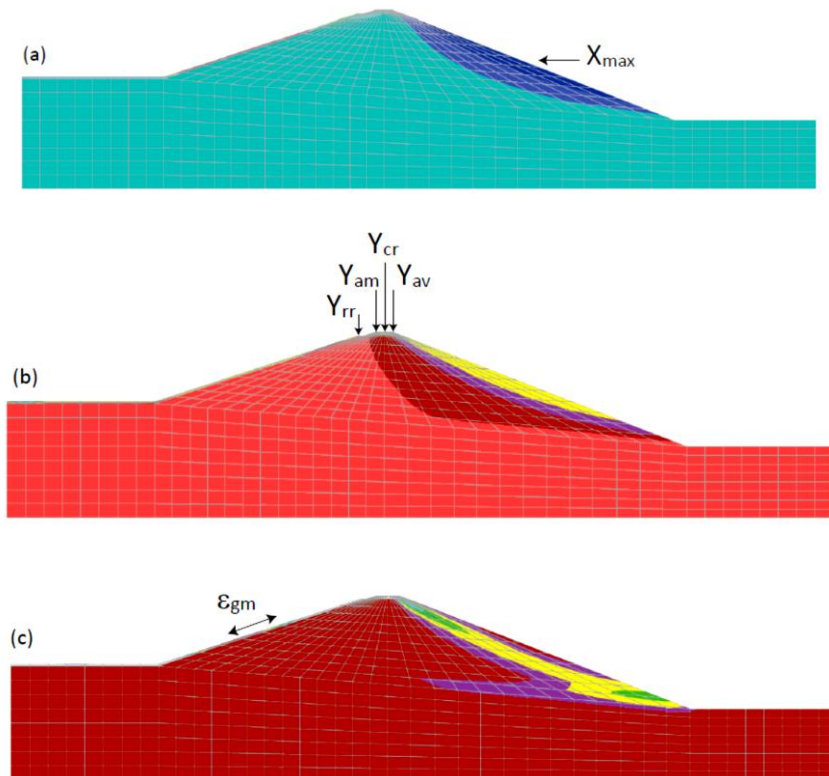
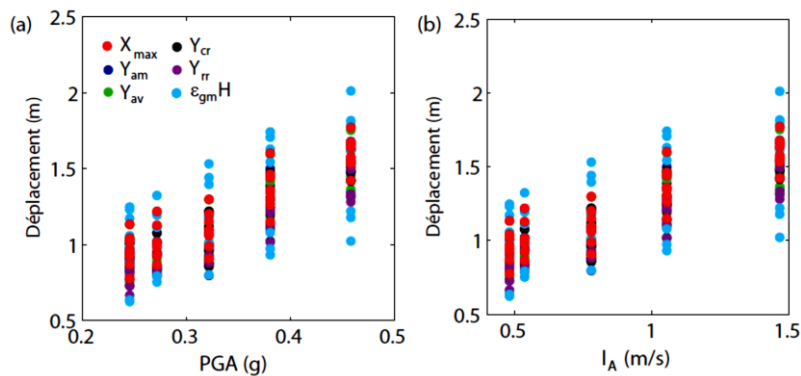


Fig. 8 : Indices de performance sismique : (a) déplacement maximum horizontal X_{max} , (b) tassements du rip-rap Y_{rr} , en amont Y_{am} , en aval Y_{av} et à la crête Y_{cr} , (c) déformation maximale de la géomembrane ϵ_{gm} .

La figure 9 présente l'ensemble des données de l'étude paramétrique. Les indices de performances que sont les déplacements permanents, sont tracés en fonction des caractéristiques sismiques. Notons que nous considérons un déplacement caractéristique pour la géomembrane en multipliant la déformation maximale ϵ_{gm} par la hauteur du remblai H . De manière attendue, on observe une croissance des déplacements avec l'augmentation du pic d'accélération au sol PGA , de l'intensité d'Arias I_A et de la durée significative du séisme τ . Par ailleurs, nous considérons la première période fondamentale, classiquement calculée à partir de la célérité des ondes de cisaillement et de la hauteur du barrage : $T_1 = \frac{2\pi}{2.4} \frac{H}{C_s}$. Dans ce cas, aucune tendance n'apparaît sur le graphique. Dans l'analyse qui suit, nous allons démontrer que le paramètre pertinent pour décrire l'endommagement sismique n'est pas directement T_1 , mais l'accélération spectrale correspondant à la période dégradée de T_1 , notée $S_a(1.5 T_1)$.



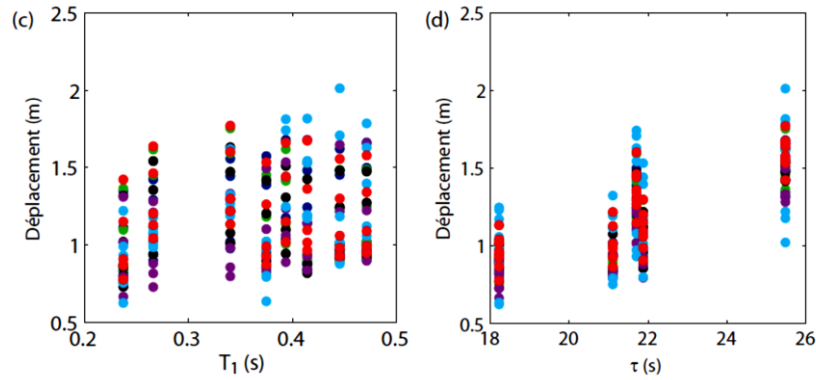


Fig. 9 : Les 6 déplacements induits en fonction de : (a) le pic d'accélération au sol PGA , (b) l'intensité d'Arias I_A , (c) la période fondamentale T_1 , (d) la durée significative τ .

2.3. Loi prédictive

Les résultats précédents montrent que les indices de performance sismique dépendent à la fois des caractéristiques du mouvement du sol et des propriétés du remblai. La figure 10 représente le déplacement horizontal maximum X_{max} en fonction des autres indices de déplacements Y_{am} , Y_{av} , Y_{rr} , Y_{cr} et $\epsilon_{gm}H$. D'une part, nous pouvons constater que l'ensemble des points se regroupent autour de la droite de pente 1. Ce graphique montre ainsi qu'il existe une corrélation linéaire simple entre les différentes magnitudes de déplacements permanents.

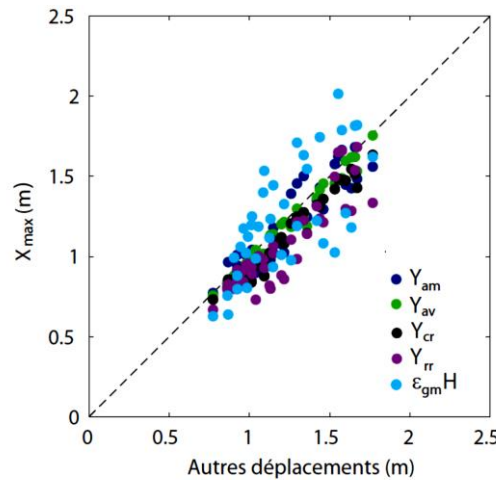


Fig. 10 : Déplacement maximum horizontal X_{max} en fonction des autres déplacements Y_{am} , Y_{av} , Y_{rr} , Y_{cr} et $\epsilon_{gm}H$.
La ligne en tiret représente $y = x$.

D'autre part, nous proposons de construire un nombre sans dimension à partir des paramètres d'entrée qui permette de décrire par une relation unique l'ensemble des indices de performance obtenus par les simulations. Comme évoqué précédemment, nous avons considéré l'accélération spectrale correspondant à la période 1.5 fois T_1 , notée $S_a(1.5 T_1)$. Cette grandeur prend en compte à la fois la spécificité spectrale du séisme et son impact sur le remblai. La figure 11 représente séparément chacun des déplacements sismiques permanents simulés sous $FLAC$, adimensionné par $I_A T_1$, en fonction de la grandeur sans dimension $S_a(1.5 T_1)/PGA$. On constate que chaque indice de performance ainsi rationalisé suit une loi linéaire, dont les coefficients sont similaires.

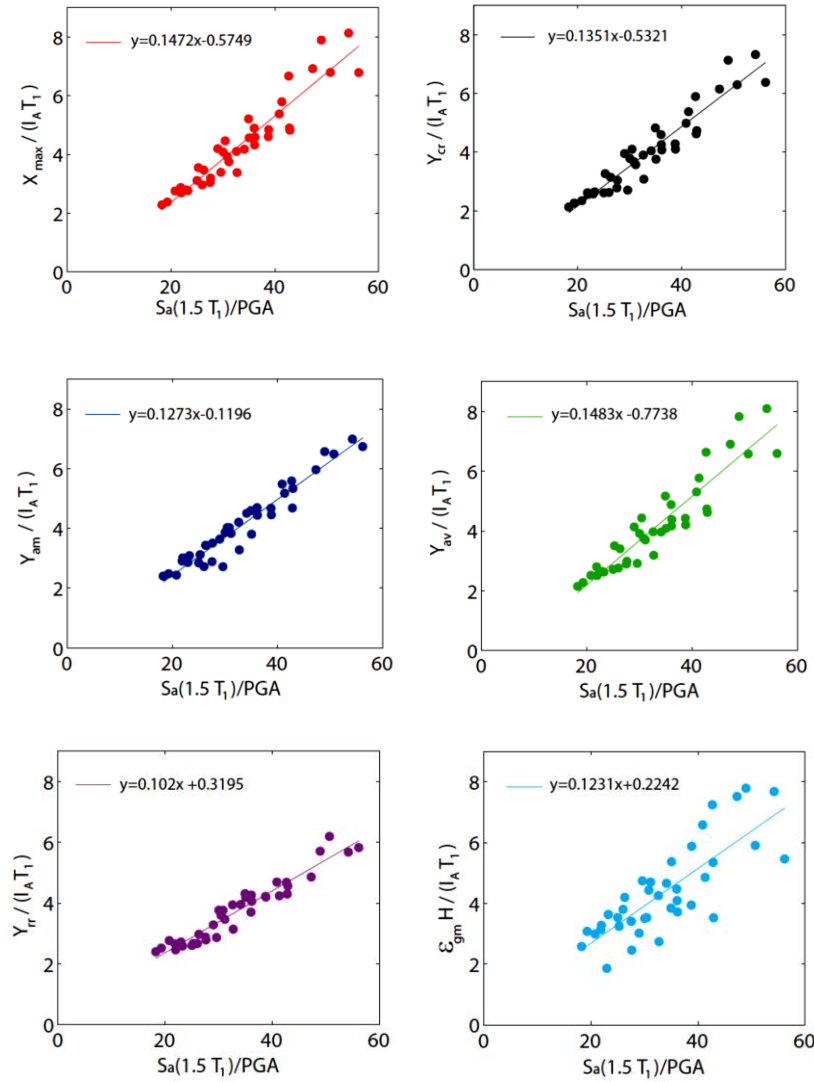


Fig. 11 : Les indices de performance adimensionnés par $l_A T_1$ en fonction du nombre sans dimension $S_a(1.5 T_1)/PGA$.

A partir de ces différents ajustements, on peut donc déduire une relation unique pour décrire les déplacements adimensionnés induits par un séisme telle que :

$$U^* = 0.13 \frac{S_a(1.5 T_1)}{PGA} - 0.24$$

où $U^* = \frac{U}{l_A T_1}$ avec U indice de performance sismique, à savoir X_{max} , Y_{am} , Y_{av} , Y_{rr} , Y_{cr} et $\epsilon_{gm} H$.

Ainsi, la figure 12 compare les déplacements prédits par la loi ci-dessus avec l'ensemble des indices de déplacements simulés sous *FLAC* concernant les différents organes de l'ouvrage. La ligne en pointillé représente l'ajustement linéaire $y = 0.63x + 0.41$ ($R^2=0.705$). Le nuage de points se regroupe néanmoins autour de la droite de pente 1 moyennant une certaine dispersion. Il s'agit d'un accord du premier ordre qui ne permet pas une description précise mais une estimation pour un pré-diagnostic de la performance sismique applicable à l'ensemble des barrages en remblai alpins.

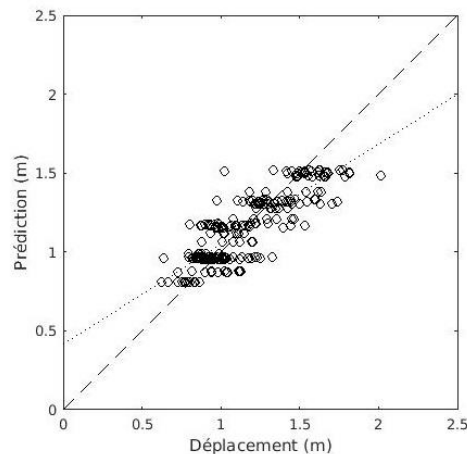


Fig. 12 : Prédiction par la loi adimensionnée $U^* = 0.13 \frac{S_a(1.5 T_1)}{PGA} - 0.24$.
La ligne en tiret représente $y = x$ et celle en pointillé $y = 0.63x + 0.41$.

En particulier, concernant les pratiques et recommandations relatives à l'évaluation de la sûreté des barrages, le méta-modèle développé ci-dessus permet de calculer le tassement post-sismique en crête d'une retenue d'altitude. Ce résultat apporte une information cruciale quant à la prédiction de la revanche nécessaire en cas de surverse suite à un séisme.

2.4. Exemple d'application

Pour illustrer l'utilisation de l'approche proposée, la performance sismique du barrage de Vars a été analysée. Ce cas d'étude est présenté dans l'article [1]. Il s'agit d'un réservoir de montagne situé dans les Alpes du Sud ayant une hauteur de 21 m et retenant 125 000 m³ d'eau (cf. Fig. 13). Le remblai du barrage est constitué de moraine dont les caractéristiques géomécaniques sont une cohésion c de 5 kPa, un angle de frottement ϕ de 35° et un module élastique G de 480 MPa. La réglementation européenne exige que son dimensionnement soit vérifié pour un aléa sismique correspondant à une période de retour de 2500 ans caractérisé par un PGA de 2.8 m/s². La première période fondamentale du barrage T_1 a été estimée égale à 0.12 et l'accélération spectrale $S_a(1.5 T_1)$ égale à 7.0 m/s. Une série de 10 accélérogrammes a été générée selon la même méthodologie que les analyses précédentes (cf. §1.1.3) parcourant une gamme d'intensité d'Arias I_A allant de 0.4 à 2.9 m/s. A partir de ces données d'entrée, l'application directe de la loi prédictive développée dans cette étude, à savoir $\frac{U}{I_A T_1} = 0.13 \frac{S_a(1.5 T_1)}{PGA} - 0.24$ mène à des déplacements induits de 0.4 à 3 cm. En comparaison, comme indiqué dans [1], l'analyse découplée (méthode de Newmark) prédit des déplacements post-sismiques entre 3 et 13 cm. Le bon accord en termes d'ordre de grandeur entre ces deux résultats conforte la pertinence de l'approche proposée par nos travaux.

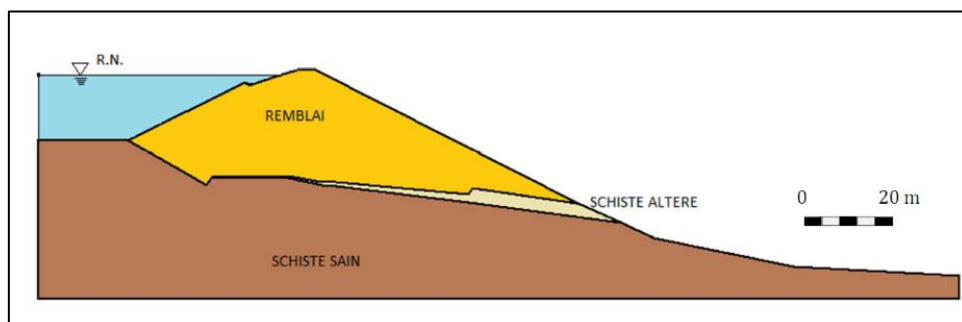


Fig. 13 : Coupe transversale du barrage de Vars.

3. ANALYSE DE RISQUE

Dans le cadre des EDD, les analyses de risque vis-à-vis du séisme doivent être menées en respectant la réglementation en vigueur en France et en suivant les recommandations MEDDE (2014) [11]. D'après celles-ci, la vérification de la sécurité des barrages doit être assurée pour un séisme d'évaluation de sécurité (SES) et un séisme de base d'exploitation (SBE). Les caractéristiques de ces séismes sont données dans l'arrêté du 6 août 2018 qui fixe les prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages (Ch. IV, Annexe I et Ch. IX, Annexe II) et l'action sismique correspondant est évaluée au choix par une approche forfaitaire ou spécifique, fondée sur une étude déterministe ou probabiliste. Pour l'approche forfaitaire par exemple, l'ATB indique les accélérations de calcul correspondant à l'occurrence du séisme SES, en fonction de la classe des barrages et de leur localisation (zone de sismicité).

Pour démontrer la stabilité de l'ouvrage lors d'un séisme, il est conseillé d'adopter des approches progressives. En lien avec nos travaux, la méthode d'évaluation que nous avons développée s'inscrit dans cette démarche par études graduées. Ainsi, à partir des spectres réglementaires, il est possible d'obtenir les paramètres d'entrée de notre méta-modèle, à savoir PGA, I_A, T_1 et $S_a(1.5 T_1)$, selon différentes techniques spécifiques (par désagrégation d'aléa sismique, loi d'atténuation...). La loi prédictive proposée au § 2.3 permettrait alors d'estimer un critère de performance en termes de déplacements post-sismiques. En termes de cotation du risque sismique, comme il est d'usage, la probabilité d'occurrence est déduite *a priori* des périodes de retour réglementaires à prendre en considération selon la classe des ouvrages.

En l'état, les limites de notre méthode portent sur la prise en compte d'une gamme de paramètres géomécanique et sismique qui cible uniquement les retenues d'altitude dans l'arc alpin franco-italien. Pour autant, la loi prédictive faisant intervenir des nombres sans dimension (cf. §2.3), son domaine de validité est potentiellement extrapolable à d'autres contextes. Une éventuelle généralisation de la prédiction empirique proposée pourrait faire l'objet d'une poursuite de nos travaux. Rappelons enfin que nous ne traitons pas du risque de liquéfaction pendant le mouvement sismique car celui-ci concerne les sols saturés. En effet, les données de calage de notre méta-modèle portent sur des retenues étanchées par géomembrane pour lesquelles nous avons uniquement étudié le cas où le remblai reste sec. Nous excluons donc le phénomène de montée de pression interstitielle qui est à l'origine de la liquéfaction des sols. Néanmoins, au vu de la méthodologie déployée, il est tout à fait envisageable d'étendre la modélisation numérique ayant généré la base de données au cas des sols saturés par un couplage hydro-mécanique (*via* des modules FLAC intégrant des lois de comportement adaptées) pour inclure le cas de liquéfaction.

4. CONCLUSION

Ces travaux de recherche ont permis d'élaborer un outil d'évaluation de la performance sismique des retenues d'altitude situées dans la zone alpine frontalière entre la France et l'Italie. Pour cela, nous avons établi une base de données pertinente à partir de modélisations numériques complexes qui simulent la réponse dynamique et non-linéaire d'un barrage soumis à un séisme. D'après le retour d'expérience, nous avons d'abord procédé à une détermination de la gamme des paramètres géotechniques des ouvrages hydrauliques et le contexte sismique des sites en question. Ensuite, nous avons développé plusieurs modèles numériques avancés, dont les calculs sont basés sur la méthode des différences finies explicites. La modélisation numérique s'est effectuée selon les étapes suivantes :

- La modélisation complète de la retenue d'altitude, comprenant une pente du site et un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG), a été développé en 2D.
- La validation du méta-modèle par comparaison avec des travaux antérieurs basés sur une méthode simplifiée de détermination des déplacements permanents [1].
- L'étude paramétrique, en variant de manière aléatoire les différents paramètres d'entrée. En particulier, nous avons mené une étude de sensibilité sur 5 accélérogrammes afin de tester l'influence de la variabilité du contenu fréquentiel de signaux sismiques.

Pour analyser les simulations numériques, nous avons déterminé 6 indices de performance sismique à partir des glissements horizontaux, des tassements et des déformations axiales, pour chaque élément de la structure. En

exploitant ces résultats, nous avons finalement établi une relation empirique qui prédit l'amplitude des dommages en fonction d'un nombre sans dimension comportant à la fois des informations sur les spécificités géotechniques de l'ouvrage et sur l'aléa sismique du site. Ainsi, ce méta-modèle développé à partir des caractéristiques des retenues d'altitudes de l'arc alpin franco-italien pourrait potentiellement être élargi à d'autres configurations géotechniques et sismiques.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Veylon, G., Luu, L. H., Mercklé, S., Bard, P. Y., Delvallée, A., Carvajal, C., & Frigo, B. (2017). A simplified method for estimating Newmark displacements of mountain reservoirs. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 518-528.
- [2] Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall.
- [3] Jibson, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes. *Engineering Geology*, 122, 43-50.
- [4] ICOLD, C. (Ed.). (2021). *Position Paper Dam Safety and Earthquakes*. CRC Press.
- [5] Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of Landslides. Application of Geology to Engineering Practice*. New York: Geological Society of America.
- [6] Makdisi, F. H. & Seed, H. B. (1978). Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 104(7), 849-867.
- [7] Hynes-Griffin, M. E. & Franklin, A. G. (1984). Rationalizing the seismic coefficient method. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper, GL-84-13, 37p.
- [8] Peyras, L., & Mériaux, P. (2009). *Retenues d'altitude*. Editions Quae.
- [9] Vanmarcke, E. H. (1976). Structural response to earthquakes. *Developments in Geotechnical Engineering* (Vol. 15, pp. 287-337), Elsevier.
- [10] Tano, B. F. G., Dias, D., Fowmes, G. J., Olivier, F., Stoltz, G., & Touze-Foltz, N. (2016). Numerical modeling of the nonlinear mechanical behavior of multilayer geosynthetic system for piggyback landfill expansions. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(6), 782-798.
- [11] Rapport MEDDE-DGPR (2014), Risques sismiques et sécurité des ouvrages hydrauliques, 316 pages.