METHODOLOGIE SIMPLIFIEE POUR LA JUSTIFICATION AU SEISME D'UNE DIGUE SUR FONDATION MEUBLE

A simplified approach for the seismic loading verification of embankments founded on soft soils

Capucine DURAND, Emmanuel CHALJUB, Pierre-Yves BARD

ISTerre, UGA/CNRS/USMB/IRD/IFSTTAR, CS 40700 - 38058 Grenoble Cedex 9

capucine.durand2539@gmail.com, emmanuel.chaljub@univ-grenoble-alpes.fr, pierre-yves.bard@univ-grenoble-alpes.fr

Jean-Jacques FRY, Philippe KOLMAYER, Pierre TACHKER

EDF-CIH, 4 allée du lac de Tignes, Savoie Technolac, 73 La Motte Servolex jean-jacques.fry@edf.fr, philippe.kolmayer@edf.fr, pierre.tachker@edf.fr

Romain GRANJON

CNR Ingénierie - 2 rue André Bonin - 69004 LYON r.granjon@cnr.tm.fr

Florence RENALIER

GéophyConsult, 159, quai des Allobroges – 73000 Chambéry

florence.renalier@geophyConsult.com

MOTS CLEFS

Barrage en terre, fondation meuble, séisme, stabilité au séisme, méthodologie simplifiée

KEY WORDS

Earth dam, embankment, soft foundation, earthquake, seismic stability, simplified approach

RÉSUMÉ

Les remblais de faible hauteur, généralement moins compactés que les ouvraqes de plus grande taille, se sont révélés vulnérables aux sollicitations sismiques.. Compte tenu de l'importante longueur cumulée des digues de canaux et de la diversité de leurs gestionnaires, il est rarement possible de réaliser des analyses détaillées impliquant des simulations numériques complexes, en particulier dans les zones de sismicité modérée. L'analyse de leur capacité à résister aux charges sismiques nécessite donc l'utilisation d'outils simples, basés sur quelques paramètres facilement disponibles. Cet article présente le principe du développement d'un outil simple permettant d'évaluer l'accélération maximale en crête de remblai et l'accélération maximale de blocs glissants potentiels. L'outil simplifié est basé sur une étude paramétrique numérique 2D combinant 135 configurations réalistes de remblais et de couches de sol naturelles et quatre niveaux de charge, caractérisés par une accélération maximale au rocher affleurant (0.01, 0.1, 0.3 et 0.5 g). Le comportement non-linéaire des sols est pris en compte via une approche linéaire équivalente. Les résultats des 540 simulations 2D sont ensuite représentés par des modèles simples obtenus avec une approche "réseau de neurones artificiels" et utilisant des paramètres de la digue et du sous-sol facilement accessibles. Une application à un ouvrage réel, comparée à une analyse par la méthode des éléments finis (Plaxis), permet de porter un premier jugement sur la simplicité et l'efficacité de la méthode. Cette comparaison s'avère satisfaisante compte tenu des hypothèses simplificatrices propres à chaque approche.

ABSTRACT

Small embankments are much more vulnerable than large ones to seismic loading. Given the very long cumulative length of channel dikes and the high diversity of their owners, it is rarely possible to carry out detailed analyses involving complex numerical simulations, particularly in areas of moderate seismicity. The analysis of their ability to resist seismic loads therefore requires the use of simple tools, based on a few easily available parameters. This article presents the development of a simple tool to evaluate the maximum peak acceleration of the dike and the maximum acceleration of potential sliding blocks. The simplified tool is based on a parametric, 2D numerical analysis combining 135 realistic configurations of small embankments over foundation soil layers and four seismic load levels, characterized by the peak acceleration at the outcropping rock (0.01, 0.1, 0.3 and 0.5 g). The non-linear behaviour of soils is taken into account using an equivalent linear approach. The results of the 540 2D simulations are then represented by simple models obtained with an "artificial neural network" approach and using easily accessible dike and subsoil parameters. An application to a real embankment, compared to an analysis by the finite element method (Plaxis), allows to make a first judgment on the simplicity and efficiency of the method. The Plaxis / simplified model comparison is satisfactory given the simplifying assumptions specific to each approach.

1. INTRODUCTION

La stabilité au séisme des digues le long des rivières ou des canaux ainsi que celle des barrages en terre de faible hauteur doit être vérifiée. Cependant, compte tenu de la longueur importante de ces structures, il est rarement possible de réaliser des modèles numériques complexes pour chaque tronçon représentatif dans des régions de sismicité modérée. Il est économiquement intéressant, voire obligatoire, de développer des outils simples permettant d'identifier les tronçons les plus faibles pour lesquels des simulations plus complexes sont nécessaires. Durand et al. (2017) [8] ont montré les limites des méthodes simplifiées existantes et, en particulier, la nécessité de fonder les outils simplifiés sur des modèles réalistes tenant compte de la présence des sols de fondation sous l'ouvrage, ainsi que des phénomènes de dissipation d'énergie (amortissements intrinsèque et radiatif). Un nouvel outil simplifié à base physique fournissant l'accélération maximale en crête de remblai et l'accélération maximale de blocs glissants potentiels en fonction de quelques paramètres d'entrée simples est présenté ci-après, ainsi que son évaluation sur un ouvrage réel, le barrage d'Arcizans (Hautes Pyrénées) par comparaison avec une modélisation Plaxis.

2. SIMULATIONS NUMERIQUES ET OUTIL SIMPLIFIE

L'outil simplifié, objet principal de la thèse de Durand (2018) [9], est basé sur une étude paramétrique numérique en 2D. Cette étude a été réalisée dans un premier temps dans le but d'évaluer les principaux mécanismes qui influencent le plus le mouvement de la digue. Ces calculs numériques conduisent également à la création de la base de données nécessaire au développement d'un outil de prédiction simple. Les modèles numériques doivent être à la fois réalistes (afin de prendre en compte les principaux phénomènes affectant le mouvement d'un remblai) et relativement simples (pouvant s'appliquer à de nombreuses situations en vue d'en déduire un outil simplifié).

2.1.Situations considérées

Une étude paramétrique numérique a été réalisée pour évaluer la réponse sismique d'un ensemble de digues réalistes couvrant un large éventail de propriétés géométriques et mécaniques. Comme l'illustre la Figure 1a, chaque modèle représente une digue de section trapézoïdale symétrique reposant sur une fondation constituée d'une couche de sol horizontale, surmontant un rocher élastique. La digue est homogène, alors que la couche de sol présente une augmentation du module de cisaillement avec la profondeur représentant l'effet de la pression de confinement sur les propriétés mécaniques. Cette évolution est renseignée dans les modèles sous la forme d'une augmentation de la vitesse des ondes de cisaillement avec la profondeur, selon la formule indiquée sur la Figure 1b, où V_a et V_b sont les vitesses des ondes S aux profondeurs $z_a = 0$ m et $z_b = 1000$ m, respectivement. Ce gradient de vitesse des ondes de cisaillement a été utilisé notamment par Boudghene-Stambouli et al. (2018) [2].

De plus, en chaque point de la couche de sol de fondation, l'effet de la pression de confinement supplémentaire liée à la présence du remblai a été convertie en augmentation de profondeur Δz , réinjectée ensuite dans l'équation de la Figure 1b pour obtenir une augmentation de V_s . Cet incrément Δz est déterminé à l'aide de la solution de Flamant (1892) [12] en fonction des masses volumiques de la digue et du sol, de la hauteur de la digue H_d et de l'angle délimité par le point où l'incrément est calculé et les deux extrémités de la base de la digue.

Dans la digue et la couche de sol, la vitesse des ondes P (qui peut affecter les effets 2D) est prise égale à trois fois la vitesse des ondes S et la masse volumique est égale à 2000 kg/m³. Dans le rocher, la vitesse des ondes S est prise égale à 800 m/s, celle des ondes P à 2300 m/s et la masse volumique à 2500 kg/m³.

Au total, 540 modèles numériques différents sont considérés, caractérisés par cinq paramètres (représentés en bleu sur la Figure 1a. Les valeurs prises par les paramètres sont listées dans le Tableau 1 : sont donc pris en compte dans cette étude 9 digues différentes (3 géométries et 3 vitesses d'onde S), 15 couches de sol de fondation (5 épaisseurs et 3 profils de vitesse), et 4 niveaux de chargement.

- Trois hauteurs de digue H_d (la largeur de la crête L_c , le fruit fr des pentes et la largeur à la base L_b sont adaptés en fonction H_d afin de prendre en compte des sections réalistes).
- Cinq valeurs d'épaisseur de la couche de sol de fondation H_{c} .
- Trois valeurs pour la vitesse des ondes S dans la digue V_d .
- Trois profils de vitesse $V_c(z)$ dans la couche de sol, correspondant à différentes valeurs de $V_{S_{30}}$, qui dépendent des valeurs de V_a et V_b dans l'équation de la Figure 1b.
- Quatre niveaux de chargement caractérisés par l'accélération maximale rocher affleurant, noté \widehat{PGA} dans cette étude.



 $V_{S_{20}}$ correspondantes

Figure 1 :	Modèles	considérés	dans	l'étude	paramétriaue
rigare 1.	moucies	constactes	aans	/ ctuuc	parametrique

Leur réponse sismique a été calculée pour 8 formes d'onde différentes. Chacune d'entre elles est dérivée d'enregistrements horizontaux réels de la base de données RESORCE [1] obtenues sur des sites rocheux, ajustés aux spectres de dimensionnement de la réglementation française en utilisant une technique d'ajustement avec maintien de la phase [4]. Chaque accélérogramme est mis à l'échelle à la valeur souhaitée de \widehat{PGA} pour le modèle considéré.

		Nombre			Valeurs		
Géométrie	Digue H_d (m)/ L_c (m)/ fr/L_b (m)	3	4/4/1.5/16		10/6/2.5/56	20/10/3/130	
Scontenie	Epaisseur Couche de sol H_c (m)	5	3	10	30	100	300
	Digue V_d (m/s)	3	200		300		500
Vitesse ondes S	Couche de sol V _c (m/s) $(V_{S_{30}}/V_a/V_b)$	3	125 (125/80/480)		250 (250/160/950)	(50	500 00/434/1000)
Niveau de chargement	PGA (g)	4	0.01		0.1	0.3	0.5

Tableau 1: Valeurs des paramètres des modèles considérés dans l'étude paramétrique

2.2. Simulations viscoélastiques 2D

2.2.1. Approche numérique

La réponse sismique des 135 digues aux 8 signaux pour 4 niveaux de chargement a été calculée avec le code d'éléments spectraux SPECFEM2D [18]. Ce code implémente la méthode des éléments spectraux dans l'espace avec un ordre polynomial N = 4, et une méthode explicite aux différences finies du second ordre dans le temps. La Figure 2 présente un schéma illustrant les modèles numériques réalisés. La largeur totale du domaine de calcul est de 4000 m, avec le remblai au milieu et s'étend jusqu'à une profondeur de 1500 m. Le maillage spatial est constitué de quadrangles. La résolution du maillage est adaptée à la longueur d'onde de cisaillement afin de garantir l'acceptabilité des résultats jusqu'à 25 Hz. Dans tous les modèles, le mouvement d'entrée est introduit sous la forme d'une onde plane à incidence verticale, imposée à une profondeur de 1200 m. La polarisation du mouvement imposé coïncide avec la direction horizontale dans le plan (onde SV). Des conditions aux frontières absorbantes sont utilisées sur les bords latéraux et à la base des modèles. La réponse impulsionnelle des 540 modèles est calculée jusqu'à une fréquence de 25 Hz, puis convoluée avec les 8 accélérogrammes.



Figure 2 : Schéma illustrant les principales caractéristiques des modèles numériques (échelle non respectée)

2.2.2. Prise en compte de la non-linéarité

Il a été fait recours à une approche hybride linéaire équivalente, les propriétés mécaniques étant spécifiées à chaque point du maillage en fonction de la réponse 1D linéaire équivalente de la colonne de sol correspondante (incluant le cas échéant la hauteur de digue) pour le même niveau de chargement. Les modèles 2D ont été discrétisés en une succession de colonnes de sol verticales 1D pour lesquelles une réponse équivalente linéaire est effectuée. Ce sont ainsi 495 colonnes de sol dont la réponse a été calculée avec SHAKE91 [15] pour 8 accélérogrammes à chaque niveau de PGAr. L'évolution du module de cisaillement et de l'amortissement a été considérée selon les modèles de Darendeli (2001) [6] pour un indice de plasticité de 0% (maximum de non-linéarité) : ces courbes permettent la prise en compte d'une dépendance de la dégradation avec la pression de confinement (c'est-à-dire la profondeur) qui est vraiment significative pour les colonnes de sol de grande profondeur. Pour chaque colonne, le profil de module d'amortissement et de cisaillement équivalent moyen dérivé des 8 formes d'onde d'entrée pour un niveau \widehat{PGA} donné est ensuite utilisé dans les modèles 2D où cette "colonne locale 1D" est rencontrée.

2.2.3. Sortie : accélérations maximales en crête et pour des blocs potentiellement glissants

Pour chacun des 540 cas, la réponse dynamique de la digue est caractérisée par les valeurs de l'accélération horizontale maximale en crête, appelée $a_{crête_{max}}$ (540 valeurs), et les valeurs maximales temporelles de l'accélération d'ensemble de cinq blocs potentiellement glissants, nommées $a_{bloc_{max}}$ (540 × 5 = 2700 valeurs). La géométrie de ces blocs est indiquée sur la Figure 3 : chaque bloc, partant du rebord amont de la crête, est caractérisé par sa profondeur maximale y_b normalisée par la hauteur de la digue H_d , Cinq valeurs ont été considérées pour englober des glissement superficiels à profonds : $y_b/H_d = 1/4$, 1/2, 3/4, 1 et (1 + $3/H_d$). Les cercles de glissement des quatre premiers ont une tangente horizontale à leur limite aval, tandis que le cinquième, plus profond, a une tangente horizontale à l'aplomb du pied de la digue



Figure 3 : Géométrie des blocs glissants

2.3. Résultats : bref aperçu

Ces accélérations maximales sont caractérisées de façon adimensionnelle par leur rapport à l'accélération maximale au rocher de référence \widehat{PGA} , que l'on peut aussi appeler "amplification en crête". Les valeurs s'étalent de 0,19 (cas d'une digue haute et peu rigide sur sol épais et mou soumis à un fort chargement : $H_d = 20$ m, $H_c = 100$ m, $V_c = 125$ m/s, $V_d = 200$ m/s, $\widehat{PGA} = 0.5$ g) à 4.22 (pour une digue peu rigide sur sol raide et peu épais, soumis à un très faible chargement: $H_d = 10$ m, $H_c = 3$ m, $V_c = 500$ m/s, $V_d = 200$ m/s, $\widehat{PGA} = 0,01$ g). Sa valeur moyenne (géométrique) est de 1,23 et sa variabilité sur les 540 cas est caractérisée par un écart-type logarithmique de 0,74, ce qui correspond à un facteur de multiplication ou de division 2,09.

De même, les rapports d'amplification d'accélération maximale temporelle pour des blocs potentiellement glissants couvrent également une large plage de valeurs allant de 0,18 (glissement profond, sol meuble épais, fort chargement : $H_d = 20$ m, $H_c = 100$ m, $V_c = 125$ m/s, $V_d = 300$ m/s, $\widehat{PGA} = 0.5$ g, $y_b/H_d = 1,25$) et 3,7 (glissement superficiel, sol peu épais et raide, digue raide, faible chargement: $H_d = 10$ m, $H_c = 10$ m, $V_c = 500$ m/s, $V_d = 200$ m/s, $\widehat{PGA} = 0,01$ g, $y_b/H_d = 0,25$). Sa valeur moyenne est égale à 1,01 avec un écart-type logarithmique de 0,66, ce qui correspond à un facteur multiplicatif de 1,94.

Les principaux mécanismes physiques contrôlant l'amplification à la crête peuvent être appréhendés sur la Figure 4 représentant l'amplification en crête pour deux niveaux de chargement (faible à gauche et fort à droite), dans le plan adimensionnel formé par le contraste de vitesse digue/sol (V_d/V_c) et le rapport d'épaisseur sol/digue (H_c/H_d) . Ces paramètres adimensionnels sont similaires à ceux proposés par Sarma (1979) [21], à savoir le contraste d'impédance et le rapport de temps de propagation des ondes S dans la digue et la couche de sol. La Figure 4a considère le cas de petites déformations (cas linéaire pour une faible valeur de \widehat{PGA}). Dans cette situation, l'accélération en crête est généralement supérieure à celle du rocher de référence. L'amplification est particulièrement forte lorsque le remblai est plus mou que la couche de sol : cette situation favorise le piégeage des ondes dans la digue, affecté également par sa géométrie (topographie). Lorsque la couche de sol est molle (fortes valeurs de V_d/V_c), l'amplification est principalement due à l'effet de site 1D dans la couche de sol. La comparaison entre la Figure 3a et la Figure 3b indique le fort impact de la non-linéarité sur l'accélération maximale en crête, systématiquement inférieure au cas de faible sollicitation, et ce en particulier pour les couches de sol molles et épaisses (fortes valeurs élevées de V_d/V_c et H_c/H_d) qui conduisent à une forte dissipation d'énergie. Il reste important de noter que, même si la Figure 4 montre certaines tendances générales, il n'est cependant pas possible d'en déduire une relation analytique simple entre la valeur prise par $a_{crête_{max}}$ et les trois paramètres considérés.



Figure 4: Niveau d'ampli fication pour l'accélération en crête $a_{crête_{max}}/PGA$ dans le plan "contraste de vitesse" (V_d/V_c) / Contraste d'épaisseur H_c/H_d dans les cas de chargement faible (PGA = 0.01g, gauche) et fort (PGA = 0.5g, droite).

Des résultats similaires sont également obtenus pour les blocs de glissement, comme détaillé dans Durand (2018) [9]. Les résultats montrent que $a_{bloc_{max}}$ est inférieur ou égal à $a_{crête_{max}}$, en particulier lorsque les effets topographiques sont importants et lorsque le bloc est profond. Dans ce cas, l'amplification maximale de l'accélération est située près de la crête ; par conséquent, le moyennage de l'accélération sur l'ensemble du bloc glissant à chaque pas temporel conduit nécessairement à des valeurs plus faibles pour un bloc profond. La réduction entre l'accélération maximale d'un bloc et l'accélération maximale en crête reste cependant inférieure à celle prévue par les modèles de Makdisi et Seed (1978) [17] pour des ouvrages sur base rigide, comme l'illustre la Figure 5.



Figure 5 : Positionnement des rapports d'accélérations maximales bloc/crête calculés numériquement sur l'abaque de Makdisi et Seed (1978)

2.4. Développement de modèles prédictifs par réseau neuronal

2.4.1. Principe

Comme mentionné précédemment à propos de la Figure 4, les valeurs d'amplification de l'accélération maximale présentent une relation complexe et non linéaire avec les paramètres des modèles, à savoir H_d , V_d , H_c , V_c , \widehat{PGA} (et y_b pour les blocs glissants). Dans l'objectif de développer des outils de prévision simples, la première étape est d'identifier les paramètres principaux (ou les combinaisons de paramètres) les plus pertinents contrôlant ces valeurs d'amplification, et l'étape suivante consiste à développer un modèle permettant d'approcher la dépendance complexe reliant ces paramètres pertinents ainsi identifiés aux amplifications d'accélération maximale. Ces deux étapes ont été réalisées avec une approche en réseaux de neurones artificiels. En bref, cette méthode d'apprentissage statistique conduit à des relations entre les sorties et un ensemble de paramètres d'entrée, sans hypothèse a priori sur les formes fonctionnelles. Ces atouts ont conduit à un fort développement de ces approches, notamment pour des applications à l'étude des effets de site ([2], [3], [14], [19]) ou des mouvements du sol (GMPEs, [7]). Les relations entrées - sorties sont élaborées au terme d'une phase d'apprentissage sur un sous-ensemble des données disponibles, contrôlée sur d'autres sous-ensembles indépendants de façon à assurer la robustesse de la prédiction (phases de test et de vérification). Nous avons considéré ici une des architectures les plus courantes : le perceptron multicouche (voir par exemple [7]).

2.4.2. Modèles "optimaux"

Les paramètres d'entrée de chaque modèle prédictif doivent être représentatifs des mécanismes physiques qui contrôlent la valeur des paramètres de sortie $a_{crête_{max}}$ et $a_{bloc_{max}}$. Cette représentativité peut être évaluée en évaluant la performance de chaque modèle prédictif, c'est à dire sa capacité à prédire les valeurs cibles. La performance seule ne suffit cependant pas, il faut aussi s'assurer que le nombre de paramètres d'entrée reste limité, et que le nombre de degrés de liberté (nombre de neurones dans la couche cachée) reste également limité pour éviter un surajustement artificiel. Une procédure d'arrêt précoce est utilisée afin d'éviter les sur-ajustements (cf [9] pour plus de détails). Enfin, l'application d'un outil prédictif à des cas réalistes nécessite que ses paramètres d'entrée puissent être facilement estimés. Au final, la difficulté de concevoir un modèle prédictif réside dans un compromis entre performance et complexité.

Pour caractériser la performance de nos modèles prédictifs, nous comparons l'erreur quadratique moyenne (RSME, écarttype des différences entre prédictions ANN et simulations numériques), à l'écart type initial σ_0 sur les valeurs de sortie cibles, calculé sur l'ensemble des simulations (au nombre de 540 ou 2700, respectivement pour $a_{crête_{max}}$ ou $a_{bloc_{max}}$), ainsi que la corrélation entre les valeurs cibles et les valeurs prédites. Une forte réduction de cet écart-type correspond à une bonne performance du réseau, et signifie en particulier que les paramètres d'entrée choisis sont en mesure d'expliquer les valeurs de sortie cibles.

Les meilleures combinaisons de paramètres d'entrée ont été identifiées grâce à une approche itérative qui peut être illustrée par l'exemple de la sélection des paramètres d'entrée pour la prédiction de $a_{crête_{max}}$. La Figure 4 montre les effets du contraste de vitesse V_d/V_c , du rapport des épaisseurs H_c/H_d et de \widehat{PGA} sur la valeur $a_{crête_{max}}$. Cependant, l'utilisation de ces trois paramètres comme entrée d'un réseau neuronal s'est avérée assez peu satisfaisante. De plus, la non-linéarité devrait être plus corrélée au niveau de déformation en cisaillement qu'à la seule valeur de \widehat{PGA} . Ce dernier paramètre ne prend de plus que quatre valeurs discrètes dans notre jeu de simulations (0,01, 0.1, 0.3 et 0.5 g), ce qui limite l'échantillonnage. D'autres combinaisons de paramètres plus pertinents ont donc été testées, comme par exemple $PGV/V_{S_{30}}$, où PGV est la vitesse sol maximale (en haut de la couche) et $V_{S_{30}}$ la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement sur les trente premiers mètres du sol, est considéré comme un proxy acceptable ([16]). Ce proxy n'utilise pas les paramètres des simulations numériques, mais on peut approcher PGV par le rapport PGA / pulsation fondamentale de la couche, puis supposer que cette pulsation est proportionnelle à V_c/H_c et enfin on peut remplacer $V_{S_{30}}$ par V_c pour obtenir l'approximation suivante de la déformation maximale dans la couche : $\widehat{PGA} \frac{H_c}{V_c^2}$.

L'utilisation de V_d/V_c , H_c/H_d et $\widehat{PGA}\frac{H_c}{V_c^2}$ comme paramètres d'entrée d'un nouveau réseau neuronal conduit alors à une meilleure performance. L'ajout d'un quatrième paramètre d'entrée pour d'autres tests a montré que le surplus de complexité n'était pas compensé par un gain substantiel dans la précision des prédictions. Enfin, il faut noter que les paramètres d'entrée mentionnés ci-dessus utilisent des informations qui ne sont pas toujours facilement mesurables. La vitesse minimale de l'onde de cisaillement au sommet de la couche $V_{c_{min}}$ et la fréquence de résonance fondamentale de la fondation f_0 (qui est reliée au rapport à V_c/H_c) sont beaucoup plus faciles à obtenir (comme montré par les mesures sur digues présentées dans [9]. On a donc choisi d'établir un autre modèle en remplaçant V_c par $V_{c_{min}}$ et H_c par $V_{c_{min}}/f_0$. Cette approche itérative a donc conduit à un total de quatre modèles neuronaux, listés dans le Tableau 2.

Réseau neuronal	Sortie	Entrées				
ANN1-A		V_d/V_c	H_c/H_d	$\widehat{PGA} H_c / V_c^2$		
ANN1-B	a _{crêtemax} /PGA	$V_d/V_{c_{min}}$	$V_{c_{min}}/(H_d f_0)$	$\widehat{PGA} / (f_0 V_{c_{min}})$		
ANN2-A		V_d/V_c	H_c/H_d	$\widehat{PGA} H_c / V_c^2$	y_b/H_d	
ANN2-B	$a_{bloc_{max}}/PGA$	$V_d/V_{c_{min}}$	$V_{c_{min}}/(H_d f_0)$	$\widehat{PGA} / (f_0 V_{c_{min}})$	y_b/H_d	

Tableau 2: Paramètres d'entrée et sortie des modèles neuronaux finaux. Tous les paramètres sont pris en ln.

La valeur de RMSE obtenue pour la prédiction de $\ln(a_{crête_{max}}/\overline{PGA})$ est égale à 0.15 avec le réseau ANN1-B, ce qui correspond à une réduction de 80% de l'écart type initial. Comme détaillé dans [9] et [10], ce modèle prédit le résultat de la simulation numérique d'origine avec une précision de 16%. Quant aux modèles donnant $\ln(a_{bloc_{max}}/\overline{PGA})$, la valeur de RMSE est égale à 0.15, ce qui correspond à une réduction légèrement inférieure de l'écart type initial (74%). La précision sur la prédiction est à nouveau égale à 16%.

2.4.3. Abaques

Les sorties des réseaux de neurones développés sont représentées sous forme d'abaques afin de proposer un outil visuel complémentaire offrant une alternative à une utilisation purement « mathématique » des modèles prédictifs. Pour chaque réseau de neurones, une série d'abaques est proposée. Lorsque le réseau fait appel à trois paramètres d'entrées (réseaux ANN1-A et ANN1-B permettant de prédire l'accélération maximale en crête), les sorties du réseau sont représentées avec un code couleur dans le plan formé par deux paramètres, pour une valeur fixe du troisième. Pour les réseaux faisant appel à quatre paramètres d'entrée (ANN2-A et ANN2-B permettant de prédire l'accélération maximale d'un bloc potentiel de glissement), deux paramètres sont fixés pour représenter les sorties avec un code couleur dans le plan formé par les deux autres paramètres. Ces abaques sont fournis dans Durand (2018) [9], et sont utilisés dans la suite de cet article lors de l'application de la méthode simplifiée. A titre d'exemple, les abaques développés à partir du réseau ANN1-B sont présentés sur la Figure 6.



Figure 6 : Abaques développés pour l'estimation de l'amplification de l'accélération maximale en crête par rapport au rocher affleurant. Les sorties du réseau ANN1-B sont représentées dans le plan formé par $V_d/V_{c_{min}}$ et $\widehat{PGA}/(f_0 V_{c_{min}})$ pour trois fractiles de $V_{c_{min}}/(H_d f_0)$: 25% (à gauche), 50% (au centre) et 75% (à droite). Les ronds o suivent le même code couleur et représentent les données numériques issues des calculs SPECFEM.

3. VALIDATION CROISEE AVEC PLAXIS SUR LA DIGUE D'ARCIZANS

L'objet de ce chapitre est de comparer sur le cas d'une digue réelle les résultats de la méthode simplifiée présentée précédemment avec des calculs dynamiques transitoires et une loi de comportement élastoplastique non linéaire.

3.1. Présentation de l'ouvrage et données d'entrée

La digue d'Arcizans (Figure 7) est un ouvrage en remblai en terre homogène à étanchéité amont d'environ 13 m de hauteur, créant une retenue d'une capacité de 420 000 m³, à proximité immédiate d'Argelès-Gazost. Sa fondation est constituée d'alluvions meubles d'une dizaine de mètres d'épaisseur reposant sur le substratum schisteux. Les reconnaissances réalisées sur l'ouvrage permettent d'en caractériser les propriétés dynamiques essentielles.

- Les mesures de bruit de fond interprétées en H/V suivant les recommandations SESAME [22] fournissent les fréquences de résonance de la fondation seule et du système fondation-digue. Un autre type de traitement [11] a aussi conduit à proposer des profils de vitesse Vs simplifiés en accord avec les mesures (Figure 9).
- Un essai Cross-hole [13] exceptionnellement réalisé pour ce type d'ouvrage a permis des mesures précises des vitesses de propagation des ondes de cisaillement Vs dans le corps du remblai et dans la fondation et de les comparer à celles de la géophysique. Les résultats du cross-hole sont cohérents avec les profils de vitesse issus de H/V. Ils montrent une augmentation de vitesse avec la profondeur dans le remblai et en partie supérieure du rocher et confirment l'inversion de vitesse dans les matériaux fins de la fondation avec une vitesse de 245 m/s constante dans la couche argileuse de 10 m.
- Des essais pénétrométriques CPT, interprétés suivant l'approche du NCEER [23] ont permis d'écarter le risque de liquéfaction dans le remblai et les limons de fondation. Cette vérification est nécessaire à l'utilisation de la méthode simplifiée.
- Des essais triaxiaux cycliques pilotés en déformation [5] fournissent des points de recalage expérimentaux pour les courbes de dégradation du module de cisaillement et d'amortissement en fonction de la distorsion qui peuvent pour ces matériaux fins être déduits des abaques de Darendeli [6] en fonction de l'indice de plasticité.

Ces essais fournissent les données d'entrée à la méthode simplifiée de C. Durand et au calcul aux éléments finis réalisé avec la loi de comportement dite « Hardening Soil small (HSsmall)» du logiciel Plaxis [20][20]. Cette loi élastoplastique permet ainsi de rendre compte de la dégradation du module de cisaillement G/Gmax avec la distorsion γ et de l'augmentation de l'amortissement D suivant la fomulation de Hardin-Drnevich [20]. La Figure 9 présente une comparaison des profils de vitesse mesurés sur site et des profils adoptés pour la méthode simplifiée et le calcul Plaxis. La Figure 10 montre cette même comparaison pour les propriétés dynamiques des limons de fondation présentant un IP voisin de 15, valeur qui ne peut être prise en compte pour l'instant dans la méthode simplifiée, dont les abaques ne sont actuellement disponibles que pour IP=0.



Figure 7: coupe-type de la digue d'Arcizans



Figure 8: Rapports spectraux H/V bruit de fond mesurés en crête de digue (gauche) et en champ libre (droite



Figure 9: comparaison des profils de vitesse Vs issus des mesures in situ et de ceux utilisés dans les calculs



Figure 10: courbes de dégradation du module de cisaillement et d'amortissement en fonction de la distorsion



1.1						
	Digue d'Arcizans					
	Hd	13	m			
	Vd	350	m/s			
	Hc	10	m			
	Vcmin	250	m/s			
	Vs30	250	m/s			
	f0 (Hz)	6.25	Hz			
	\widehat{PGA}	2	m/s²			

Figure 11: caractéristiques géométriques de la digue et vitesses des ondes de cisaillement des sols (gauche) ; contenus fréquentiels des séismes (droite)

3.2.Application de la méthode simplifiée

Les accélérogrammes utilisés pour le calcul Plaxis correspondent à ceux ayant servi à constituer les abaques de la méthode simplifiée [9]. L'accélération maximale sur tous accélérogrammes est calée à la valeur de $\widehat{PGA} = 2 \text{ ms}^{-2}$, tandis que les formes spectrales des accélérogrammes notés « Z4C » et « Z4A » diffèrent par leurs contenus fréquentiels (Figure 11).

Les données du tableau précédent déterminent les coordonnées caractéristiques de la digue et du séisme qui sont reportées sur les abaques (Figure 12 et Figure 13). Le déplacement maximal du bloc est ensuite calculé en appliquant les abaques de Seed-Makdisi [17] donnant le déplacement normalisé d'un bloc débouchant à la profondeur y depuis la crête en fonction du ratio k_c/k_{max}(bloc) avec k_c l'accélération critique du bloc, correspondant à un facteur de sécurité de 1 déterminée par une méthode pseudo-statique à partir des résistances mécaniques des matériaux. Les résultats sont donnés dans le Tableau 4 et comparés à ceux donnés par Plaxis.

3.3.Comparaison avec Plaxis

La bonne reproduction des fréquences fondamentales de la fondation et du système fondation+digue mesurées en H/V assure la représentativité du modèle Plaxis, à l'exception des hautes fréquences sans conséquence sur la digue.



Figure 12 : Utilisation des abaques de Durand (2018) permettant de prédire l'amplification en crête (voir paragraphe 2.4.3) sur le cas de la digue d'Arcizans (dont les paramètres correspondant à l'étoile noire sur chaque abaque). L'abaque de gauche fait appel aux paramètres des simulations numériques, l'abaque de droite fait appel à des paramètres a priori plus facilement mesurables.



Figure 13 : Utilisation des abaques de Durand (2018) permettant de prédire l'accélération maximale d'un bloc défini par $y_b/H_d = 0.5$ (figures du haut) et d'un bloc défini par $y_b/H_d = 1$ (figures du bas) sur le cas de la digue d'Arcizans (dont les paramètres correspondant à l'étoile noire sur chaque abaque). Les abaques de gauche font appel aux paramètres des simulations numériques, les abaques de droite fait appel à des paramètres a priori plus facilement mesurables.



Figure 14: Amplification de l'accélération par rapport au rocher en fonction de la fréquence (crête à gauche ; surface du TN à droite)

Les accélérations calculées en champ libre sont également en accord avec l'amplification attendue pour une classe de sol E (Tableau 3), tandis que les accélérations maximales obtenues en crête sont voisines de celles fournies par la méthode simplifiée : celles obtenues avec les séismes « Z4C » contentant plus de hautes fréquences se rapprochent plus du résultat de l'abaque 1 que celles obtenues avec les séismes « Z4A » contenant plus de basses fréquences qui se rapprochent plus du résultat de l'abaque 2.

a_max TN (m/s2)						
Eurocode	(classe E)	Z4C_1	Z4C_2	Z4A_1	Z4A_2	
3.	60	3.10	3.50	3.16	3.24	
a_max crete (m/s2)						
Abaque du réseau ANN1	Abaque du réseau ANN2	Z4C_1	Z4C_2	Z4A_1	Z4A_2	
3.8	3.3	3.94	4.14	3.42	3.48	

Tableau 3: comparaison des accélérations maximales en champ libre et en crête données par la méthode simplifiée et Plaxis

Le Tableau 4 compare les déplacements irréversibles prédits avec la méthode simplifiée et l'abaque de Seed-Makdisi avec ceux obtenus par le calcul Plaxis. Les quatre séismes étudiés avec Plaxis conduisent à des déplacements irréversibles d'une dizaine de millimètres la digue vers l'aval qui s'accompagnent d'un tassement du même ordre de grandeur. Les isovaleurs de déplacement montrent une déformation d'ensemble de la digue. Aucun cercle de glissement de crête n'est ainsi mis en évidence, tandis que le grand cercle de glissement (en noir sur la Figure 15) n'intéresse que la partie aval du remblai. Les glissements superficiels obtenus avec Plaxis sur le parement aval sont du même ordre de grandeur que le déplacement irréversible issu de la méthode simplifiée pour les cercles débouchant à mi-talus (y/H entre 0.5 et 0.75). Pour le grand cercle, les deux méthodes conduisent de déplacements du même ordre de grandeur compris entre quelques millimètres et 2.3 cm en fonction de l'abaque retenu (ANN1, ANN2) ou du contenu fréquentiel de l'accélérogramme voire de la durée de phase forte. Les deux approches s'accordent aussi sur l'absence de déplacement irréversible vers l'amont.

Cercle de glissement		y/h=1	y/H=0.75	y/H=0.5
Méthode s	simplifiée	profond	tendu	crête
Aval	Aval k _c (m/s ²)		2.16	1.96
amont	k _c (m/s²)	2.94	4.12	4.12
Aval	k _c /k _{max}	0.68	0.77	0.70
AVdi	k _c /k _{max}	0.51	0.54	0.49
amont	kc/k _{max}	1.23	1.47	1.47
amont	kc/k _{max}	0.92	1.03	1.03
Aval	LL (are)	0.5	0.3	0.5
	U _{max} (Cm)	2.3	2.1	3.3
a mant		0.0	0.0	0.0
amont	U _{max} (Cm)	0.0	0.0	0.0
Calcul Plaxis		« cercle » noir*	cercle rouge*	(voir Figure 15)
	U _{z4C_1} (cm)	0.3	0.6	S.O.
A	U _{z4C_2} (cm)	0.6	0.8	S.O.
AVal	U _{Z4A_3} (cm)	1.0	1.4	S.O.
	U _{Z4A_4} (cm)	1.0	1.8	S.O.

Tableau 4: comparaison des déplacements des surfaces de glissement étudiées avec la nouvelle méthode simplifiée de C. Durand et avec la modélisation Plaxis



Figure 15: déformée et isovaleur des déplacements en fin de séisme (Z4A_4 et glissements rouge et noir étudiés)

D.02 – Méthodologie simplifiée pour la justification au séisme d'une digue sur fondation meuble page 12

4. CONCLUSION

Cette nouvelle méthode propose de nouveaux modèles prédictifs d'évaluation de l'accélération maximale en crête de digue et de l'accélération maximale d'un bloc potentiellement glissant, qui combinent une relative simplicité de résultats (les relations mathématiques correspondantes peuvent être implémentées dans tout tableur avec un nombre réduit d'entrées faciles à mesurer) et une base de modélisations rigoureuses et réalistes (simulations 2D prenant en compte la fondation meuble, la non-linéarité des sols, et les phénomènes de dissipation d'énergie : amortissements matériel et radiatif).

Les réseaux de neurones artificiels se sont avérés être un outil très utile pour obtenir des relations simples à partir des résultats numériques. Deux séries de deux réseaux neuronaux sont développées dans ce travail. La première série fournit la valeur de l'accélération maximale en crête à partir d'un indicateur de contraste de vitesse $V_d/V_{c_{min}}$, un indicateur de rapport d'épaisseur $V_{c_{min}}/(H_d f_0)$ et un indicateur de déformation $\widehat{PGA}/(V_{c_{min}} f_0)$. Les paramètres requis sont donc l'épaisseur et la vitesse de l'onde de cisaillement dans la digue (H_d, V_d) , la vitesse minimale de l'onde de cisaillement dans le sol de fondation $(V_{c_{min}})$, la fréquence fondamentale du sol (f_0) , et l'accélération au rocher de référence \widehat{PGA} . La deuxième série fournit l'accélération maximale de blocs potentiellement coulissants, en complétant les paramètres d'entrée précédents par la profondeur du bloc glissant, à savoir y_b/H_d . Des abaques ont également été développés pour fournir un outil plus visuel (Figure 12, Figure 13) à ceux que rebutent les équations peu intuitives associées aux modèles neuronaux. Cette représentation est également très utile pour identifier l'espace où les paramètres d'entrée sont valides et pour visualiser les principales tendances.

La mise en œuvre de cette méthode exige une phase probatoire, où sa qualification sera évaluée par comparaison à des résultats de calculs non linéaires complets et à des données instrumentales enregistrées sur des barrages. Le premier test de comparaison montre une bonne adéquation sur les accélérations maximales. Les déplacements irréversibles qui consituent la grandeur d'intérêt sont accessibles via les abaques de Seed-Makdisi et la détermination d'une accélération critique kc : ces déplacement irréversibles maximaux calculés ensuite avec l'abaque de Seed-Makdisi sont légèrement supérieurs à ceux calculés avec Plaxis.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Akkar, S. et al. 2014. Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE). Bulletin of Earthquake Engineering 12(1):311-339.
- [2] Boudgene-Stambouli, A., P.-Y. Bard, E. Chaljub, P. Moczo, J. Kristek, S. Stripajova, C. Durand, D. Zendagui and B. Derras, 2018. 2D/1D Aggravation Factors: From A Comprehensive Parameter Study To Simple Estimates With A Neural Network Model. 16ECEE (16th European Conference on Earthquake Engineering), Thessaloniki, Greece, June 18-21, 2018, paper 624, 12 pages.
- [3] Boudghene-Stambouli, A., Zendagui, D., Bard, P.-Y. and Derras, B., 2017. Deriving amplification factors from simple site parameters using generalized regression neural networks: implications for relevant site proxies. Earth, Planets and Space 69-99.
- [4] Causse, M., Laurendeau, A., Perrault, M., Douglas, J., Bonilla, L. F., Guguen, P. 2014. Eurocode 8- compatible synthetic time-series as input to dynamic analysis. Bulletin of Earthquake Engineering 12(2):755-768.
- [5] CEREMA , 2014, « Barrage d'Arcizans : compte-rendu d'essais de laboratoire », C14MX0287 & C14MX028
- [6] Darendeli, M. B. 2001. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PHD thesis. The University of Texas at Austin.
- [7] Derras, B., P.Y. Bard, F. Cotton and A. Bekkouche, 2012. Adapting the neural network approach to PGA prediction: an example based on the KiK-net data, Bull.seism.Soc. Am Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 4, pp. 1446-1461, August 2012, doi: 10.1785/0120110088.
- [8] Durand, C., Chaljub, E., Bard, P.-Y., Baillet, L., Fry, J.-J., Granjon, R., Renalier, F. 2017. Revisiting Sarma's method for seismic response of embankments: first results. 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chili.
- [9] Durand, C. 2018. Stabilité des digues sous chargement sismique : vers une nouvelle génération de méthodes simplifiées. Thèse Communauté Université Grenoble Alpes (Isterre), 388 pages.
- [10] Durand, C., E. Chaljub, P.-Y. Bard, J.-J. Fry, R. Granjon & F. Renalier, 2019. A new simple neural-network based approach to predict the seismic response of levees and small height earth dams. 7ICEGE (7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering), Rome, Italy, June 17-20, 2019, 9 pages.
- [11] ENTPE, 2015, « Mesures vibratoires du barrage d'Arcizans », 17 février 2015

- [12] Flamant, A. (1892). Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement. Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 114: 1465-1468.
- [13] FUGRO, 2014, « Barrage d'arcizans : Investigations cross-hole », C.R. 14-62-008-CR001.01.A
- [14] Giacinto, G., Paolucci, R., Roli, F. 1997. Application of neural networks and statistical pattern recognition algorithms to earthquake risk evaluation. Patter Recognition Letters.
- [15] Idriss, I. M., Sun, J. I. 2012. User's manual for SHAKE91.
- [16] Idriss, I. (2011). Use of Vs30 to represent local site conditions. In Proceedings of the 4th IASPEI/IAEE international symposium. Effects of surface geology on seismic motion, Santa Barbara, California, USA.
- [17] Makdisi, F. et Seed, H. (1978). Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 104(7):849{867.
- [18] Martin, R., Komatitsch, D., Blitz, C., Le Goff, N. 2008. Simulation of seismic wave propagation in an asteroid based upon an unstructured MPI spectral-element method: Blocking and non-blocking commu- nication strategies. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics).
- [19] Paolucci, R., Colli, P., Giacinto, G. 2000. Assessment of seismic site effects in 2-D alluvial valleys using neural networks. Earthquake Spectra 16(3):661-680.
- [20] PLAXIS, 2017, "Tutorial Manuel"
- [21] Sarma, S. K. 1979. Response and Stability of Earth Dams during Strong Earthquakes.U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Geotechnical Laboratory.
- [22] SESAME, 2004, "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ration technique on ambient vibrations", WP12deliverable D23.12
- [23] YOUD et al., 1998, "Liquefaction Resistance of Soils : summary report from 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE 127(10), 817-833