

Retour d'expérience sur 10 années de réalisation d'essais d'érosion sur des sols provenant d'ouvrages hydrauliques

Feedback from 10 years of erosion tests on soils from hydraulic structures

R. Beguin¹, C. Moras¹, M. Boucher¹, C. Vinay¹, J.-R. Courivaud², P. Pinettes¹, C. Picault³

¹geophyConsult, 73000 Chambéry, remi.beguin.@geophyconsult.com

²EDF-CIH, 73373 Bourget-du-lac, jean-robert.courivaud@geophyconsult.com

³Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques, CNR, 69007 Lyon

Résumé

Le projet national ERINOH (ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques) a permis le développement en France de dispositifs destinés à tester en laboratoire et/ou *in-situ* la résistance à l'érosion des sols. Pour chaque typologie d'érosion, un dispositif spécifique a été développé : le HET (Hole Erosion Test) pour la caractérisation de la résistance à l'érosion de conduit [1][2]; le JET (Jet Erosion Test) adapté notamment pour l'estimation de la résistance à la surverse [3]; le CET (Contact Erosion Test) dédié à la résistance à l'érosion d'une interface entre deux couches de sols [4], ainsi que d'autres appareillages, pour la suffusion notamment. Ces essais se sont diffusés dans la profession et commencent à être régulièrement utilisés. geophyConsult commercialise des essais JET (depuis 2009), HET et CET ainsi que, ponctuellement, des essais de suffusion sur-mesure et de dispersivité. Durant ces 10 années, plus de 450 essais d'érosion ont ainsi été réalisés sur des sols constitutifs d'ouvrages hydrauliques, principalement français.

Cette base de données a été confrontée avec les classifications reconnues internationalement et des décalages systématiques ont été constatés. La gamme de résistance obtenue a été illustrée par des applications numériques (temps de rupture, conditions d'initiation...). L'analyse de la qualité des essais réalisés en fonction du type de sol testé permet de définir des gammes de sol compatibles avec chacun des dispositifs. Un bilan est aussi tiré du retour d'expérience des opérateurs sur la réalisation de ces essais : sélection d'échantillons au sein des carottes, facilité de mise en œuvre, difficultés généralement rencontrées, complémentarité entre les dispositifs... Enfin, les évolutions des bancs d'essai durant cette période sont présentées, avec notamment le développement d'un Large JET pour s'affranchir des limites de l'essai JET original.

Mots-Clés

Essai d'érosion ; HET ; JET ; CET ; Classification ; érodabilité

Abstract

The national project ERINOH (Internal Erosion in Embankment Dams) has enabled the development in France of devices dedicated to test in the laboratory and / or in situ the resistance against erosion of soils. For each type of erosion, a specific device has been developed : HET (Hole Erosion Test) for the characterization of piping [1][2]; the JET (Jet Erosion Test) more specifically adapted especially to the determination of the resistance to overtopping [3]; the Contact Erosion Test (CET) dedicated to the resistance to erosion of an interface between two layers of soil [4]; and other devices, including suffusion tests. All tests have progressively spread throughout the profession and are now used regularly. geophyConsult sells JET (since 2009), HET and CET tests, as well as more punctually tailor-made suffusion and dispersivity tests. During the last 10 years, more than 450 erosion tests have been carried out on soils of mainly French hydraulic structures.

The acquired database has been confronted with internationally recognized classifications and systematic discrepancies have been noted. The resistance range obtained has been illustrated by numerical applications (breaching time, initiation conditions, etc.). The analysis of the quality of the tests carried out according to the type of soil tested makes it possible to define soil ranges compatible with each device. An assessment is also drawn from operators' experience feedback on the way the tests have to be carry out : how should the samples be selected within the cores, how easy is the the implementation of the tests, what difficulties are generally encountered, are the devices complementary... Finally, changes in tests benches during the studied period are presented, including the development of a Large JET, aimed at overcoming the limitations of the original JET test.

Key Words

Erosion test ; HET; JET; CET; Erodability classification

Introduction

L'érosion des sols est un domaine largement étudié, notamment en rivière, sous l'angle du transport solide et de ses impacts sur la morphologie d'un cours d'eau. Dans le domaine des ouvrages hydrauliques en remblai, cette question a été abordée depuis plusieurs décennies, notamment sur l'aspect des critères de filtre pour l'érosion interne mais aussi pour l'estimation de l'érodabilité des sols [1], [3]. De 2006 à 2012, le projet national ERINOH (ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques) a accéléré le développement en France de dispositifs destinés à tester en laboratoire et/ou in-situ la résistance à l'érosion des sols ([2], [5]). Parmi les nombreux dispositifs existants en France et dans le monde, *geophyConsult* commercialise trois de ces essais arrivés au stade opérationnel : le Jet Erosion Test, développé aux USA et qui a connu ces dernières années un essor international (plusieurs milliers d'essais réalisés) ; le Hole Erosion Test, dans la version développée par IRSTEA dans le cadre notamment de ERINOH, et le Contact Erosion Test, fruit d'un développement conjoint entre *geophyConsult*, EDF et CNR. Au total, ~450 essais d'érosion à visée « opérationnelle » ont été réalisés depuis 2009, suite notamment à la diffusion de la méthodologie de diagnostic des ouvrages hydraulique en remblai utilisant les résultats de ces essais comme donnée d'entrée [5]. Cette communication est l'occasion de dresser un retour d'expérience de la réalisation de ces essais.

Les essais d'érosion

Érosion interne

Les processus d'érosion interne ont été décomposés en 8 phénomènes de détachement et 2 types de transport dans le bulletin de Barrages&Réservoir édité en 1997 pour le congrès ICOLD de Florence [6]. Cette classification a ensuite été simplifiée à l'atelier international d'Aussois, avec désormais 4 types d'érosion interne [7] : l'érosion de conduit, l'érosion de contact, l'érosion régressive et la suffusion (Figure 1). L'essai dit Hole Erosion Test et le Contact Erosion Test couvrent respectivement les problématiques d'érosion de conduit et d'érosion de contact. Pour l'érosion régressive, de nombreux dispositifs de toutes dimensions ont été développés, notamment aux Pays-Bas [8]. Ces travaux ont permis, d'obtenir des lois d'érosion basées sur la taille, l'angularité et la compacité des particules du sol. Ces paramètres suffisent à caractériser la résistance du sol (dans les gammes des sols déjà testés), du fait de l'absence de cohésion pour les sols concernés par cette problématique. En conséquence, la réalisation d'un essai d'érosion sur échantillon n'est généralement pas nécessaire pour la prise en compte du risque d'érosion régressive au cours d'un

diagnostic. La suffusion est un des phénomènes les plus complexes, avec un fort couplage entre érosion et sollicitation hydraulique. Nombre de dispositifs d'essais ont été développés, en particulier pour la France par le GeM à Saint-Nazaire [9]. *geophyConsult* a réalisé ou sous-traités un petit nombre d'essais de suffusion suite à des demandes spécifiques de clients. De par leurs spécificités, les essais de suffusion ne sont pas traités dans la présente communication.

Érosion externe

Les processus d'érosion externe nécessitent des essais en laboratoire notamment lorsque des sols cohésifs sont concernés, étant donné que la résistance à l'érosion n'est alors en pratique pas corrélable aux données d'identification (granulométrie...). L'essai de Jet Erosion Test est un des principaux essais de ce type. Pour traiter de l'érosion externe, on peut aussi mentionner l'existence d'essais en canal hydraulique et l'essai « Erosion Function Apparatus », essais initialement dédiés à l'étude de l'érosion en fond de rivière, notamment dans les zones d'affouillement [10].

La synthèse présentée ci-après se focalise sur les 3 essais commercialisés par *geophyConsult* (HET, JET et CET) qui couvrent, comme détaillé ci-dessus, une grande partie des processus d'érosion interne et externe rencontrés dans les ouvrages hydrauliques.

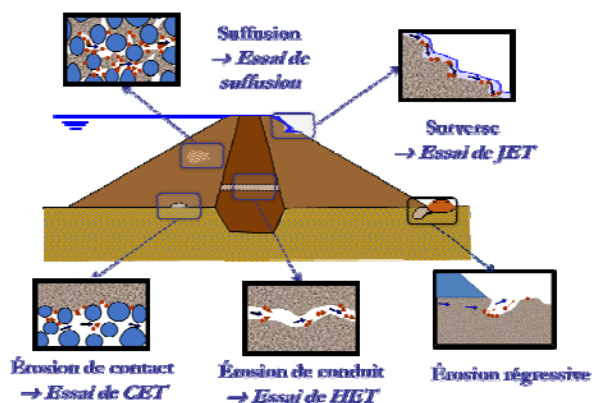


FIGURE 1 : ILLUSTRATIONS DES TYPOLOGIES D'ÉROSION ET DES ESSAIS ASSOCIÉS

Le Hole Erosion Test

Lorsqu'un défaut existe dans un ouvrage (terrier d'animaux fousseurs, fissure...) et que cet ouvrage est mis en charge, une circulation préférentielle apparaît. Selon la résistance du sol, cette circulation préférentielle peut soit être acceptable, soit mener à la formation d'un « renard hydraulique », puis d'une brèche, parfois en quelques heures seulement.

Le HET a été développé par IRSTEA à partir de précédents appareillages destinés à reproduire ce processus [11] (Figure 2 et 3). L'essai consiste à imposer un écoulement d'eau dans un trou de 6 mm de diamètre foré dans un échantillon de sol ramené au laboratoire. L'analyse de l'agrandissement du trou par érosion des parois au cours de l'essai permet de

déterminer la résistance du sol à ce type d'érosion. La méthode de modélisation de l'essai utilisée à *geophyConsult* est celle recommandée par IRSTEA, détaillée par exemple dans [12]. L'essai permet d'obtenir :

- un positionnement de la vitesse d'érosion du sol par rapport aux essais de la littérature, *via* la classification de Fell [1] (qui va de « Extrêmement rapide » à « Extrêmement lent ») ;
- la contrainte critique τ_c qui permet de déterminer les conditions hydrauliques qui entraînent l'initiation de l'érosion ;
- l'indice d'érosion I_e , qui permet d'évaluer la vitesse avec laquelle une érosion de conduit tout juste initiée est susceptible de dégénérer en brèche.



FIGURE 2 : L'ESSAI D'ÉROSION DE CONDUIT « HET » DE IRSTEA UTILISÉ PAR GEOPHYCONSULT

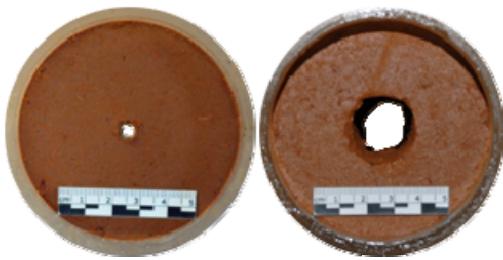


FIGURE 3: ÉCHANTILLON AVANT ET APRES ESSAI DE HET

Le Jet Erosion Test

Lors d'une surverse, l'eau s'écoule sur le parement aval de l'ouvrage, le plus souvent en formant un « escalier » composé d'une succession de mini-chutes d'eau. Ce processus est appelé « Head-cut ». Une érosion de surface de l'ouvrage est observée et peut mener à l'ouverture d'une brèche.

Pour représenter ce processus, le JET, dérivé du standard américain ASTM D5852, a été développé [3]. Il consiste à impacter la surface du matériau à tester par un jet d'eau de dimensions normées, en général à partir d'une buse d'un

quart de pouce (6,35 mm) (Figures 4 et 5). Cet essai est réalisable soit sur des échantillons de sol ramenés au laboratoire, soit in-situ, directement sur l'ouvrage en place. L'analyse de l'évolution de la profondeur de l'affouillement généré permet de déterminer la résistance du sol à ce type d'érosion. La modélisation de l'essai est réalisée par *geophyConsult* en utilisant une méthode d'ajustement aux moindres carrés sur la courbe d'affouillement en fonction du temps [13]. L'essai JET permet de déterminer :

- un positionnement de l'érodabilité du sol par rapport aux essais de la littérature, *via* la classification de Hanson [3] (qui va de « Très Érodable » à « Très Résistant ») ;
- le paramètre τ_c , qui permet d'estimer les conditions hydrauliques qui entraînent l'initiation de l'érosion ;
- le paramètre κ_d , qui, combiné avec τ_c dans un modèle d'érosion (WinDam, HR-Breach...), permet d'estimer la cinétique d'ouverture d'une brèche dans l'ouvrage.

Compte tenu de sa robustesse et de la richesse de la littérature qui le concerne, cet essai permet de caractériser l'érodabilité d'un sol de façon générale, sans forcément considérer le processus de surverse (par exemple pour comparer des remblais pressentis pour la réalisation de confortements ou d'ouvrages). Les résultats sont alors souvent utilisés de façon plus qualitative que quantitative.

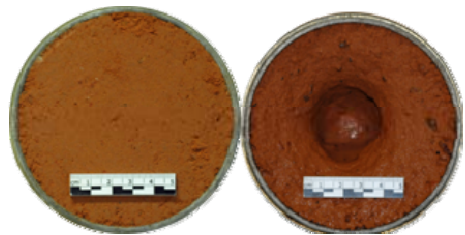


FIGURE 4 : ÉCHANTILLON AVANT ET APRES ESSAI DE JET



FIGURE 5: L'ESSAI D'ÉROSION PAR JET DE GEOPHYCONSULT

Le Contact Erosion Test

Lorsqu'une couche de sol « fin » (noyau d'ouvrage en limon ou argile...) est en contact avec une couche de sol « grossier » (fondation alluviale en graviers...) sujette à un écoulement souterrain, une érosion dite « de contact » peut se développer. La progression de cette érosion dépend i) de l'écart entre les tailles des particules de chaque couche, et ii) de l'intensité de l'écoulement.

Le CET a été développé pour reproduire ce processus en laboratoire [4] (Figures 6). Les deux couches de sol sont mises en place dans une cellule puis soumises à i) une contrainte mécanique verticale reproduisant les contraintes in-situ, et ii) un écoulement à débit imposé, augmenté par paliers successifs. L'analyse de la quantité de sol fin érodé et transporté hors de l'échantillon au cours de l'essai permet d'évaluer la résistance à l'érosion de ce couple sol fin/sol grossier. L'essai CET permet ainsi de déterminer :

- si l'écart entre les tailles de particules de chaque couche est suffisamment faible pour exclure l'érosion de contact,
- la vitesse de Darcy minimale dans la couche de sol grossier (ainsi que le gradient hydraulique associé) à partir de laquelle une érosion de contact est susceptible de se développer,
- une estimation de la perméabilité κ (m/s) du sol grossier testé,
- une analyse de la cinétique du processus.

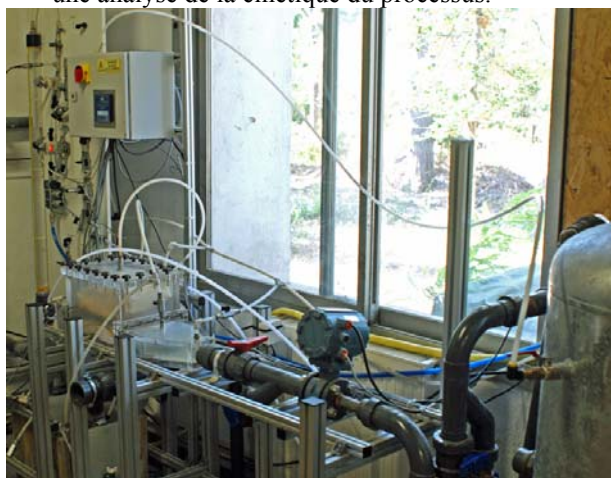


FIGURE 6 : L'ESSAI D'ÉROSION DE CONTACT DE GEOPHYCONSULT

Résumé des contraintes techniques sur les échantillons

Le Tableau 1 résume les contraintes pratiques sur les échantillons à tester en fonction du type d'essai retenu. Ces contraintes sont généralement compatibles avec les carottages standards réalisés lors des campagnes géotechniques.

TABLEAU 1 : SYNTHÈSE DES CONTRAINTES SUR LES ÉCHANTILLONS À TESTER, AVEC Φ ET L RESPECTIVEMENT LE DIAMÈTRE ET LA LONGUEUR DE L'ÉCHANTILLON

	HET	JET	CET
Echantillon labo. intact	Carotte avec $\Phi > 80$ mm et l > 100 mm	Carotte avec $\Phi > 80$ mm et l > 100 mm	Non réalisable
Échantillon labo. remanié	Au moins 1,5 kg de sol et paramètres ρ_d , w% représentatifs du sol en place	Au moins 1,5 kg de sol et paramètres ρ_d , w% représentatifs du sol en place	Au moins 10 kg de sol fin et 7 kg de sol grossier
Essai in-situ	Non réalisable	Réalisable	Non réalisable
Contraintes sur le sol	Pas ou peu de particules > 5 mm ; suffisamment de cohésion pour être pré-perçé	Pas ou peu de particules > 5 mm ;	Sol grossier suffisamment perméable ($\kappa_h > 10^{-3}$ m/s), si possible non suffusif

Exemples d'utilisation des résultats

Utilisation comparative

L'application la plus évidente des essais d'érosion est leur utilisation dans un objectif comparatif. Ainsi, ils sont régulièrement utilisés en phase de conception d'un nouvel ouvrage pour comparer plusieurs gisements de sols disponibles et sélectionner le plus résistant.

Ces essais s'avèrent aussi très pertinents pour hiérarchiser les moyens à mettre en œuvre pour le diagnostic ou le confortement d'un ouvrage existant : des essais sont réalisés sur différents tronçons d'un ouvrage de grand linéaire (ou différentes zones d'un barrage) afin de classer les zones par résistance à l'érosion et donc par priorité.

Utilisation qualitative

Ces essais d'érosions ont tous pour principe de reproduire le phénomène physique étudié au laboratoire. Une première information apportée par l'essai est une analyse du comportement du sol, principalement issue des observations visuelles de l'opérateur.

Pour l'essai HET, des sols au comportement spécifique sont ainsi identifiés : un gonflement du sol à la mise en eau qui vient colmater le pré-trou ; un effondrement de l'échantillon à la mise en eau... Pour l'essai JET, on observe parfois une érosion par détachement d'agrégats, une alternance de couches plus ou moins résistantes, qui peuvent être différenciées lors du calcul du ou des coefficients d'érosion de l'échantillon... Enfin, pour l'essai CET, on note ponctuellement l'occurrence de suffusion dans le sol grossier, l'absence complète d'érosion jusqu'à chargement hydraulique maximal pouvant indiquer une filtration géométrique entre les couches, une formation d'un filtre

naturel suite à un tri granulométrique dans le sol fin ou encore la tenue dans le sol fin de voutes rendant possible l'initiation d'une érosion de conduit.

Toutes ces informations qualitatives collectées lors de la réalisation de l'essai sont des éléments utiles pour l'ingénieur lors de l'analyse du risque d'érosion associé à un ouvrage.

Utilisation quantitative

HET

L'analyse des données acquises pendant l'essai permet d'en déduire un seuil d'initiation de l'érosion (contrainte critique ou vitesse critique) ainsi qu'une cinétique du processus une fois l'érosion initiée. En prenant comme base le schéma de la Figure 7, une illustration des possibilités d'utilisation des résultats quantitatifs est proposée ci-après.

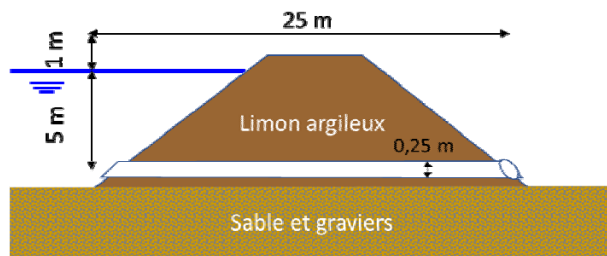


FIGURE 7 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE DIGUE POUR UNE ILLUSTRATION DE L'UTILISATION QUANTITATIVE DES RESULTATS D'ESSAI D'EROSION

Pour notre exemple d'application, nous prenons les résultats de 3 essais HET réalisés sur des carottages provenant du noyau de l'ouvrage, ayant permis d'obtenir une contrainte critique τ_c comprise entre 45 et 70 Pa et des indices d'érosion I_e entre 2,3 et 2,5. Sur cet ouvrage, les défauts pré-existants attendus sont des terriers de blaireau, plus ou moins circulaires, de taille caractéristique de l'ordre de 25 cm (Figure 7). L'apparition de fissuration est jugée peu probable. La contrainte hydraulique appliquée dans un conduit circulaire de diamètre 25 cm peut être calculée de la façon suivante (1) :

$$\tau = \frac{\rho_w (g H_f d)}{4L} \quad (1)$$

avec τ (Pa) la contrainte hydraulique appliquée sur les parois du conduit, ρ_w (kg/m^3) la masse volumique de l'eau, g (m/s^2) la gravité, H_f (m) la perte de charge dans le conduit par frottement, d (m) le diamètre du conduit et L (m) la longueur du conduit. En première approximation, les pertes de charges dans le conduit peuvent être estimées par la différence de charge amont/aval, soit ici 5 m. Cette estimation suppose qu'il n'y a pas d'éléments générant des pertes de charges à l'amont et à l'aval (étanchéité, recharge granulaire...) et que les pertes de charges singulières d'entrée/sortie peuvent être négligées. Pour un calcul plus précis se référer à [12]. L'application numérique donne une contrainte appliquée de

123 Pa pour ce chargement hydraulique. Les contraintes appliquées sont donc supérieures aux contraintes critiques identifiées par les essais HET (45 à 70 Pa) d'un facteur ~ 2 à 3 laissant présager une initiation probable de l'érosion de conduit. D'après les indices d'érosion et la classification de Fell, ce sol possède une vitesse d'érosion « Très Rapide ». Pour quantifier plus précisément cette vitesse, une application numérique est réalisée comme détaillé dans [12], équation 4.41. Ce calcul donne un temps entre l'initiation de l'érosion dans le conduit et l'ouverture de la brèche (supposée lorsque le conduit atteint 1/3 de la hauteur de l'ouvrage, soit 2 m) de l'ordre de 1 h (entre 55 et 90 min).

JET

Si des résultats d'essais JET menés sur le matériau du remblai sont disponibles, ils peuvent être directement utilisés dans un logiciel type WinDam [14] (disponible avec les références associées à cette adresse : <http://go.usa.gov/cupCF>) ou HR Breach). Ce type de logiciel modélise l'érosion de surverse par head-cut, et permet ainsi d'obtenir les conditions d'érosion en cas de surverse (vitesse de développement...) et l'hydrogramme de brèche associé. Un exemple d'utilisation de WinDam est présenté sur la Figure 8 (cf. référence [15]).

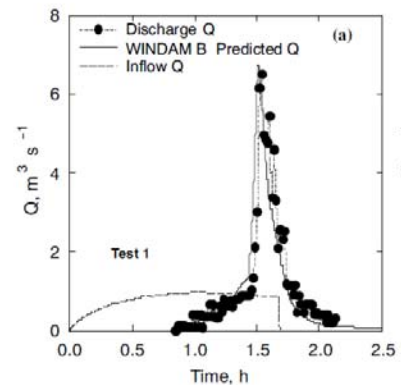


FIGURE 8 : HYDROGRAMME DE BRECHE CALCULE AVEC WINDAM B. EXTRAIT DE [15].

CET

Des échantillons de sol fin prélevés dans le remblai juste au-dessus de l'interface avec la fondation ont été testés avec des essais de CET. Ils ont été mis au contact d'un gravier standard 4/12 mm, jugé représentatif des matériaux trouvés en fondation lorsqu'ils subissent une suffusion. Les essais ont abouti à une initiation d'érosion significative pour une vitesse dans les graviers de 6 à $9 \cdot 10^{-2}$ m/s.

En prenant le chargement hydraulique défini dans l'exemple de la Figure 7 et en considérant une perméabilité maximale des graves de fondation en zone lessivée par la suffusion k_h de 10^{-2} m/s, une estimation des vitesses en fondation a été obtenue par l'équation (2).

$$v = k_d \cdot \Delta H / L \quad (2)$$

avec L (m) la longueur de parcours en fondation et ΔH (m) la différence de charge amont/aval. L'application numérique donne une vitesse de l'ordre de $2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Idéalement, cette vitesse mériterait d'être confirmée par des mesures géophysiques et/ou une modélisation numérique. Mais il n'en reste pas moins que les vitesses maximales attendues dans la zone d'étude sont 30 à 45 fois inférieures à la vitesse critique obtenue durant l'essai au laboratoire, ce qui laisse présager l'absence de risque significatif d'érosion de contact.

Facteur de sécurité

Il n'a volontairement pas été fait mention dans les exemples précédents de facteur de sécurité, car il n'existe aujourd'hui aucune recommandation officielle sur le sujet. Ce choix reste donc du ressort du maître d'ouvrage, en fonction de la qualité et de la représentativité des données dont il dispose (nombre d'essais, linéaire investigué...) et des enjeux de l'étude. Lorsqu'un grand nombre d'essais d'érosion a été réalisé, une analyse statistique des résultats peut s'avérer pertinente pour déterminer une résistance à l'érosion caractéristique associée à une probabilité donnée.

Base de données et classifications

Classifications

Des classifications ont été proposées pour les résultats des essais HET par R. Fell [1] et des essais JET par G. Hanson [16]. Ces classifications ont été établies d'après l'analyse des bases de données dont disposaient les auteurs au moment de leur élaboration. Ainsi, la classification de R. Fell a été bâtie principalement d'après des essais sur des sols d'ouvrages australiens et celle de G. Hanson a été établie majoritairement sur des essais in-situ réalisés sur des berges de rivière aux Etats-Unis. En ayant en tête ces limitations, ces classifications restent toutefois utiles pour classer rapidement un résultat d'essai par rapport à ces hiérarchisations de référence.

La confrontation de la base de données de *geophyConsult* avec ces classifications historiques est présentée Figure 9 et 10. Pour les essais JET, l'ajustement $k_d = 1,62 \cdot \tau_c^{-0,838}$ proposé par Simon et al. [16] sur la base de plus 1 000 essais a été ajouté à la représentation pour comparaison. Il apparaît que les résultats d'essais menés à *geophyConsult* sont globalement décalés vers des valeurs de τ_c plus élevées par rapport à la classification de G. Hanson. D'autre part, les k_d maximum obtenus (pour les faibles valeurs de τ_c) sont nettement plus élevés. Ces écarts peuvent s'expliquer par : 1) des différences entre les natures des sols utilisés pour bâtir ces deux classifications (sols plus grossiers avec souvent une forte proportion de graves pour la base de données de *geophyConsult*) ; 2) des évolutions dans la méthode utilisée pour interpréter les données. Comme détaillée par M.

Karamigolbaghi [17] et Simon et al. [16], des biais systématiques sont constatés en fonction de la méthode utilisée pour la modélisation de l'essai (extrapolation hyperbolique de « Blaisdell » pour les essais G. Hanson, ajustement de la courbe d'affouillement « Scour Depth » introduite par *geophyConsult* en 2010 et désormais largement adoptée ou ajustement sur la loi d'érosion directement). Ces écarts sont surtout notables pour les essais arrêtés prématurément pour lesquels une extrapolation de la profondeur maximale d'affouillement est nécessaire (essai trop court). Ces constatations impliquent que la méthode utilisée pour la modélisation d'un essai et les hypothèses retenues doivent systématiquement être indiquées dans le rapport d'essai.

Pour le HET, la gamme de résistance obtenue lors des essais *geophyConsult* est concordante avec celle obtenue par d'autres auteurs sur des sols rencontrés à l'étranger (Figure 10). Les contraintes critiques les plus faibles sont de l'ordre de 1 à 10 Pa (dans l'exemple de la Figure 2, ceci correspond à une initiation de l'érosion pour un défaut initial de taille comprise entre 2 et 20 mm) et atteignent jusqu'à 1200 Pa (initiation pour un défaut initial de 2,5 m). Les indices d'érosion vont de valeurs inférieures à 2 (brèche en quelques minutes) à des valeurs atteignant 5,5 (brèche après plusieurs mois). Ces ordres de grandeur confirment l'intérêt de l'essai pour discriminer les situations où l'érosion de conduit est un risque majeur de celles où le matériau est suffisamment résistant pour que le risque soit négligeable.

Ces classifications pourraient gagner à être revues d'après les bases de données plus complètes maintenant disponibles grâce aux nombreux travaux réalisés sur ces thématiques depuis ces publications des années 2000.

Comparaisons entre dispositifs

Des comparaisons directes des paramètres d'érodabilité obtenus sur des bancs d'essais dédiés à des types d'érosion différents ont été conduites (JET/HET dans [18], HET/CET/Suffusion dans [5]). Ces études concluent à des écarts pouvant atteindre une à deux décades sur les paramètres obtenus pour des échantillons identiques mais sur des bancs différents. L'utilisation directe, quantitative, des résultats d'un essai pour caractériser un autre type d'érosion (essai JET pour une érosion de conduit par exemple) est donc fortement déconseillée. Ces écarts s'expliquent en partie par le fait que le type de sollicitation hydraulique diffère entre les essais : écoulement normal au sol pour le JET, tangent pour le HET, en écoulement poreux pour le CET. D'autre part la géométrie de la surface érodée influe sur l'érodabilité pour certains types de sol, par exemple du fait d'un confinement latéral plus efficace lors des essais d'érosion de conduit que dans un essai JET, où la surface érodée est plane [18].

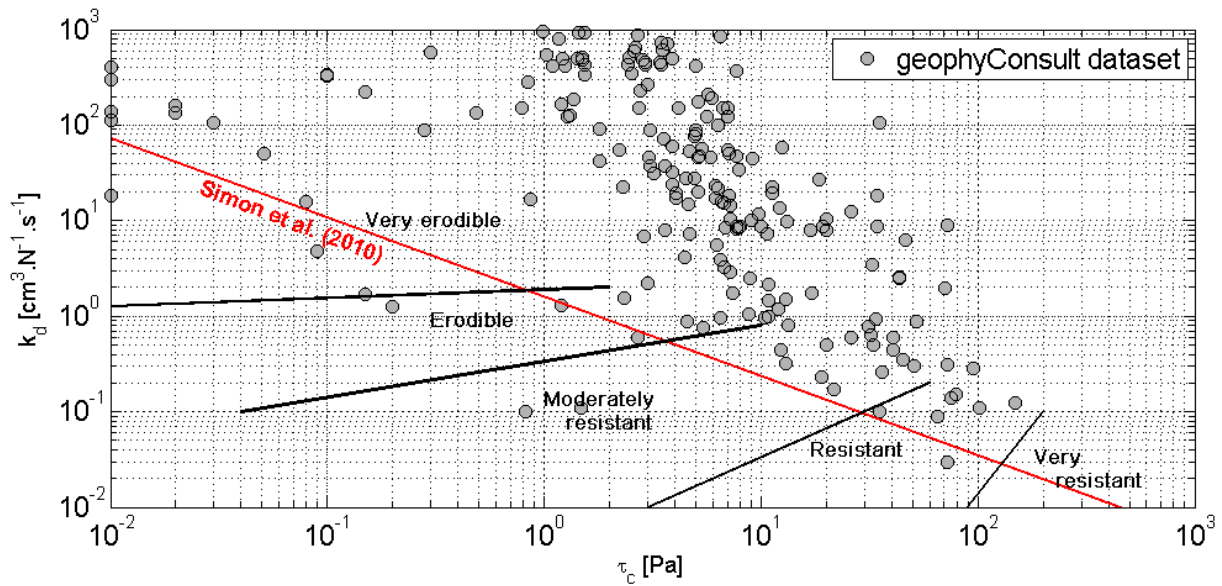


FIGURE 9 : COMPARAISON DES RESULTATS DES ESSAIS JET DE LA BASE DE DONNEES GEOPHYCONSULT AVEC LA CLASSIFICATION DE HANSON ET L'AJUSTEMENT $K_D=F(\tau_c)$ PROPOSE PAR SIMON ET AL. 2010 [6]

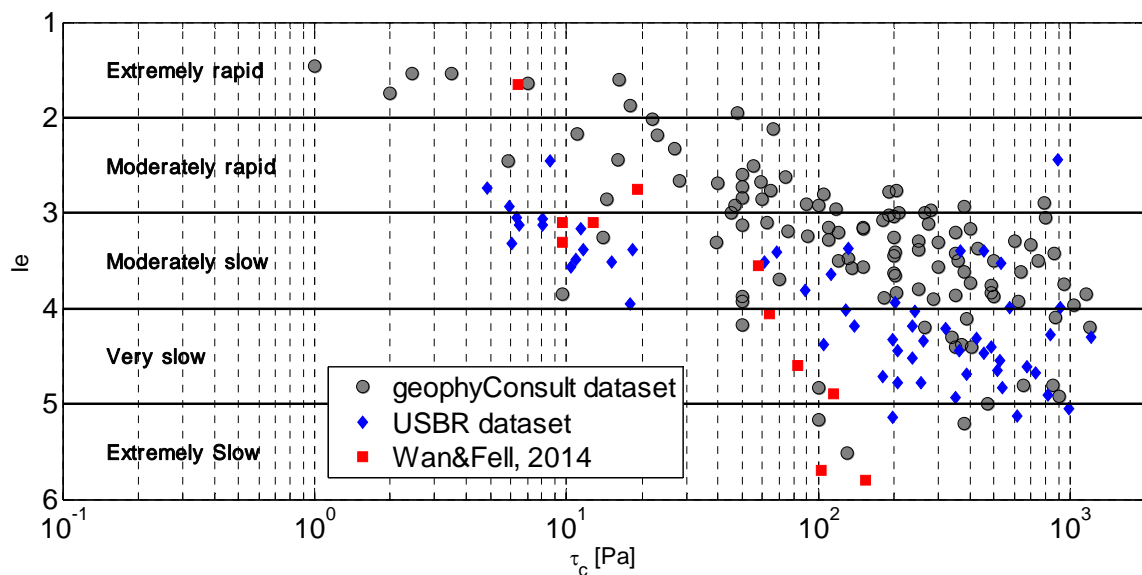


FIGURE 10: COMPARAISON DES RESULTATS DES ESSAIS HET DE LA BASE DE DONNEES GEOPHYCONSULT AVEC LES RESULTATS OBTENUS PAR L'USBR [18] ET PAR WAN&FELL [1]

Facteurs d'influence sur les résultats et corrélation

Pour un sol de constitution donnée (granulométrie, minéralogie), de nombreux facteurs influent sur sa résistance à l'érosion : densité, teneur en eau, saturation, structure... Une revue des études sur ces influences est présentée dans [12] et [19].

Afin de limiter l'impact de ces effets, il est recommandé de réaliser des essais d'érosion avec un échantillon pris dans des conditions les plus proches possibles de l'état du sol dans

l'ouvrage. De ce point de vue, l'essai *in-situ* (uniquement JET) est séduisant, bien qu'il impose des contraintes pratiques parfois rédhibitoires (disponibilité d'une alimentation en eau suffisante, acceptabilité de réaliser un essai sur le parement de l'ouvrage réel, décapage, absence de particules > 5 mm...). L'essai au laboratoire sur échantillon intact est alors une solution recommandée, à condition d'avoir utilisé une méthode de carottage adaptée et de s'être assuré de la conservation de la teneur en eau depuis le

prélèvement. L'essai sur sol remanié est à restreindre aux cas où il n'existe pas d'alternative. Dans ces cas, il est important de s'assurer d'utiliser des paramètres de remaniement (densité, teneur en eau) cohérents avec le site.

Plusieurs auteurs ont proposé des corrélations permettant de déterminer la résistance à l'érosion d'après le type de sol [1] ou les paramètres de sol [20]. Ces relations sont utiles pour réaliser des estimations des paramètres a priori (pour des études préliminaires par exemple) mais n'ont pas, à l'heure actuelle, une précision suffisante pour être utilisées pour une étude approfondie

Retour d'expérience pratique

Suite à la réalisation d'environ 450 essais d'érosion, un retour d'expérience pratique a été tiré. Les difficultés et écarts au comportement standard qui ont été constatés sont synthétisées dans le Tableau 2, avec à chaque fois les réponses apportées. Il doit être noté que des difficultés surviennent surtout lorsqu'on teste des sols en limite de la gamme adaptée à l'appareillage : sols trop résistants ou trop sableux pour le JET, sols qui n'ont pas assez de tenue pour le HET... Suite à ce retour, les types de sols entrant dans le

champ d'application des différents essais ont été représentés dans le Tableau 3. Les essais sur matériaux intacts peuvent aussi entraîner des difficultés sur la maîtrise de l'échantillon (hétérogénéité du sol, présence de graviers, fissures...). Les essais sur matériaux remaniés peuvent enfin être problématiques lorsque les paramètres du reconditionnement (ρ_d et $w\%$) sont mal sélectionnés.

Sur les ~130 essais HET réalisés, 5 % n'ont pas pu être interprétés, les écarts au comportement standard étant trop importants. Sur les ~290 essais JET réalisés 17 % n'ont pas pu être interprétés entièrement (affouillement trop faible ou trop rapide) conduisant à un résultat quantitatif simplifié (uniquement une estimation de τ_c lorsque l'affouillement est trop faible). À noter que ce taux pour le JET devrait s'améliorer avec l'évolution du banc JET (cf. chapitre suivant). Ces statistiques sont plutôt satisfaisantes et montrent qu'une majorité des essais se déroule correctement, notamment lorsque des précautions sont prises pour éviter les difficultés qui ont été ici synthétisées.

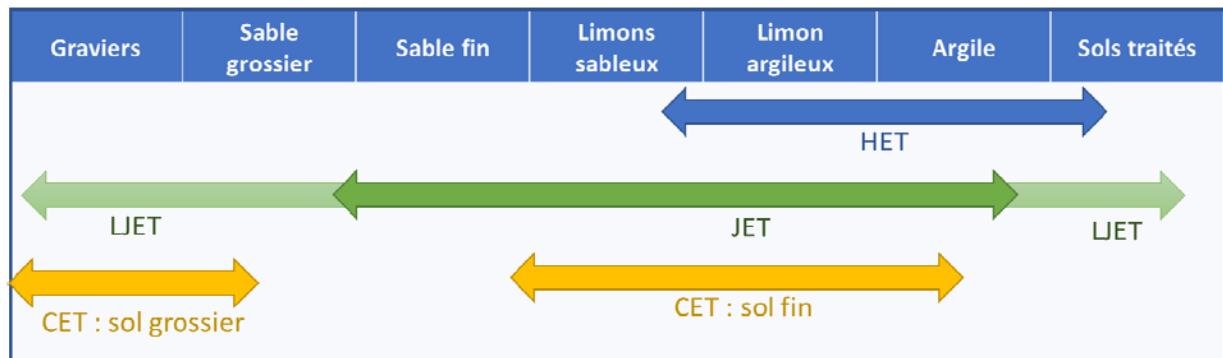
Pour l'essai CET, le nombre d'essais est insuffisant pour proposer une statistique pertinente ici.

TABLEAU 2: SYNTHÈSE DU RETOUR D'EXPERIENCE DES OPERATEURS POUR LA REALISATION ET L'INTERPRETATION DES ESSAIS D'EROSION

	JET	HET	CET
Sélection des échantillons dans des carottages, découpage d'échantillon intact, remaniement	✓ Pas de difficultés pour découper	✓ Bien vérifier l'absence de graviers, racines, fissures. Cohésion minimum requise pour pré-percer. ✓ Pas de difficultés pour découper ✓ Densité et teneur en eau à sélectionner avec attention pour un reconditionnement satisfaisant	✓ Nécessité d'avoir de l'ordre de 1 m de carotte $\Phi=80$ mm de sol fin
Préparation de l'essai	✓ Gonflement du sol à la mise en eau à surveiller ✓ Le temps entre la mise en eau de l'échantillon et le début de l'essai peut influencer sur le résultat et doit donc être fixé	✓ Gravier, fissure ou racine lors du pré-perçage → si possible changement d'échantillon ✓ Le temps entre la mise en eau de l'échantillon et le début de l'essai peut influencer sur le résultat et doit donc être fixé	✓ Supprimer la fraction fine du sol grossier lorsque c'est possible, pour éviter de superposer un processus de suffusion
Déroulement de l'essai	✓ Décrochement d'agrégats, de blocs de sol, variabilité de la résistance dans l'échantillon → informe sur l'hétérogénéité du sol. N'empêche pas la modélisation d'un comportement « moyen ». Les blocs sont retirés à la main ✓ Maximum d'affouillement qui n'est pas dans l'axe du jet → généralement temporaire. Une estimation de l'erreur est faite par l'opérateur ✓ Charge hydraulique initiale mal adaptée → Rare si opérateur expérimenté. L'essai peut être refait en ajustant la charge si c'est possible. Un	✓ Échantillon qui s'effondre → donne une information sur la tenue du sol. Si c'est en fin d'essai, cela n'empêche pas l'interprétation. Sinon, essai à refaire ✓ Pré-trou qui se rebouche par gonflement → Rare. Donne une information. ✓ Agrégats qui se détachent et bloquent le conduit / les vannes à l'aval → Pas gênant si c'est de courte durée/faible impact ou si il y a suffisamment de durée d'essai avant pour une modélisation	✓ Suffusion dans le sol grossier → Complexifie l'interprétation ✓ Érosion intense qui vient boucher les conduites → Donne une information sur la faible résistance du sol

	affichage en direct de la courbe d'affouillement permet aussi d'ajuster la charge pour l'optimiser. ✓ Effondrement continu des parois de l'affouillement → Surtout pour les sables. N'empêche pas l'exploitation mais l'essai doit être arrêté assez tôt pour limiter le phénomène.		
Analyse des résultats	✓ Stabilisation de l'affouillement non atteinte en fin d'essai / fin d'échantillon → modélisation avec une incertitude plus élevée ✓ Affouillement très faible même à charge maximale → seule une estimation de τ_c est calculée	✓ Érosion très rapide, avec pression différentielle finale très faible ne permettant pas la modélisation → Donne une information sur la faible résistance du sol	✓ Atteinte du maximum de charge hydraulique sans observation d'érosion, surtout si le sol grossier est peu perméable. → Donne un minorant de la vitesse critique

TABLEAU 3: DOMAINE D'APPLICATION PREFERENTIELLE DES ESSAIS D'ÉROSION AVEC LES CAPACITES HYDRAULIQUES DU LABORATOIRE DE GEOPHYCONSULT



Évolution des bancs d'essais

Après avoir largement évolué dans les années 2000, à la fois sur sa structure et sa méthode d'interprétation, l'essai de Hole Erosion Test tend maintenant à une stabilisation et standardisation des procédures. Une démarche de normalisation a d'ailleurs été initiée en France.

L'essai de Jet Erosion Test a aussi subi une phase de développement et d'évolution suivie par une phase de stabilisation et diffusion du dispositif, depuis les années 2000. Toutefois, récemment, de nouveaux développements à la fois sur la structure et les méthodes d'interprétations ont été initiées aux Etats-Unis avec le développement du « Mini-Jet » pour faciliter les essais in-situ, et par *geophyConsult* avec le développement d'un Large Jet Erosion Test destiné à étendre la gamme d'application de l'essai, vers des échantillons contenant des particules grossières et vers les sols renforcés, très résistants [21].

L'essai de Contact Erosion Test n'a que peu évolué dans son

principe depuis sa mise en fonctionnement. À notre connaissance, il n'est aujourd'hui utilisé qu'à *geophyConsult* pour des essais opérationnels.

Conclusion

La réalisation d'essais d'érosion pour évaluer le risque d'érosion sur des ouvrages hydrauliques s'est diffusée en France, notamment avec le projet ERINOH et dans le monde depuis plus d'une décennie. *GeophyConsult* a accompagné ce développement en réalisant ~450 essais d'érosion de JET, HET et CET à visées opérationnelles. De cette expérience, plusieurs conclusions ont été tirées :

- chaque type d'érosion est associé à un banc d'essai dédié avec des contraintes spécifiques à respecter : le cahier des charges d'une campagne d'essais doit être réfléchi pour prendre en compte ces particularités ;
- les résultats obtenus permettent d'intercomparer des sols, d'obtenir des informations qualitatives sur son comportement mais aussi de quantifier des conditions

- d'initiations et des cinétiques d'érosion ;
- la classification des résultats HET proposée par R. Fell paraît a priori adaptée aux essais réalisés par *geophyConsult*. Celle de G. Hanson pour les essais JET montre un décalage systématique avec les résultats de *geophyConsult*, et mériterait probablement d'être adaptée à une plus grande gamme de sols et aux méthodes actuelles de modélisation de l'essai ;
 - des difficultés récurrentes ont été relevées au début pour chacun de ces dispositifs, mais leur impact a pu être limité grâce à une adaptation des protocoles expérimentaux. Des résultats d'essais concluants sont obtenus dans une majorité des cas.

Références

- [1] Wan, C.F., Fell R. (2004), *Laboratory Tests on the Rate of Piping Erosion of Soils in Embankment Dams*, Geotechnical Testing Journal, 27(3), 295-303
- [2] Bonelli, S (2013). *Guide ERINOH : les essais de laboratoire*. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions 2ème Colloque national, Aix-en-Provence, 12-14 juin 2013
- [3] Hanson and Cook (2004), *Apparatus, test procedures and analytical methods to measure soil erodibility in situ*. Applied engineering in agriculture, 20 (4): 455-462.
- [4] Guidoux C., Faure Y.-H., Beguin R., Ho, C.-C. (2010), *Contact erosion at the interface between granular coarse-soils and various base-soils under tangential flow condition*, J. Geotech. and Geoenviron. Eng. Volume 136, Issue 5, pp. 741-750
- [5] IREX, Projet ERINOH (2017) *Érosion interne dans les ouvrages hydrauliques : volume 1. Méthodologie de caractérisation expérimentale*. Presses des Ponts
- [6] Fry J.J. (coord.) (1997). *L'érosion interne : typologie, détection et réparation*, Barrages & Réservoirs, n°6, 126 p.
- [7] Fell R., Fry J.-J. (coord.) (2007). *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*, Taylor & Francis, London
- [8] Van Beek, V. et al. (2013). *Backward Erosion Piping. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*. 193-269. 10.1002/9781118577165.ch3.
- [9] Marot, Didier & Rochim, Abdul & Hong Hai, Nguyen & Bendahmane, Fateh & Sibille, Luc. (2016). *Assessing the susceptibility of gap-graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology*. Natural Hazards. 83. 10.1007/s11069-016-2319-8.
- [10] Briaud, J.-L & Chen, H.-C & Li, Y & Nurtjahyo, P. (2004). *SRICOS-EFA Method for Complex Piers in Fine-Grained Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering -130. 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:11(1180).
- [11] Bonelli, Stephane & Brivois, Olivier & Benahmed, Nadia. (2007). *Modélisation du renard hydraulique et interprétation de l'essai d'érosion de trou*. Revue Française de Géotechnique. 118. 10.1051/geotech/2007118013.\$
- [12] Bonelli, Stephane & Nicot, François. (2013). *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*. 10.1002/9781118577165.
- [13] Pinettes, Patrick & Courivaud, Jean-Robert & Fry, Jean-Jacques & Mercier, Fabienne & Bonelli, Stephane. (2011). *First introduction of Greg Hanson "Jet Erosion Test" in Europe : return on experience after 2 years of testing*. 31st Annual USSD Conference, San Diego, USA, 11-15 April 2011, 11/04/2011 - 15/04/2011, San Diego, USA
- [14] USDA-ARS and -NRCS and Kansas State University: WinDAM B. (2012). WinDAM-B, Version 1.1, Computer Program Release. <http://go.usa.gov/8Oq>.
- [15] J. Hanson, G & M. Temple, D & L. Hunt, S & Tejral, Ronald. (2011). *Development and Characterization of Soil Material Parameters for Embankment Breach*. Applied Engineering in Agriculture. 27. 587-595. 10.13031/2013.38205.
- [16] Simon, A., Thomas, R.E., Klimertz, L., (2010). *Comparison and experiences with field techniques to measure critical shear stress*. 2nd Jt. Fed. Interag. Conf., Las Vegas, USA.
- [17] Maliheh Karamigolbaghi, Seyed Mohammad Ghaneizad, Joseph F. Atkinson, Sean J. Bennett, Robert R. Wells (2017), *Critical assessment of jet erosion test methodologies for cohesive soil and sediment*, Geomorphology (2017), doi: 10.1016/j.geomorph.2017.08.005
- [18] Wahl, T. L., Regazzoni, P., & Erdogan, Z. (2008). *Determining erosion indices of cohesive soils with the hole erosion test and jet erosion test*. (Hydraulic Laboratory (HL) No. DSO-08 05). Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center
- [19] S. E. Shewbridge, *Proposed USACE EM 1110-2-1913 erosion analysis guidance* (2016) Protections 2016 SA, 2nd International Seminar on Dam Protection Against Overtopping, 7-9 September 2016
- [20] Van Nghia Nguyen.(2014) *Caractérisation de l'érosion des sols par le Jet Erosion Test*. Thèse de l'Ecole Centrale Paris
- [21] Beguin Rémi, Boucher Maxime, Courivaud Jean-Robert. (2017) *The Large Jet Erosion Test*. International Workshop on overflowing erosion of dams and dikes 11 – 14th December 2017, Aussois, France