

DEVELOPPEMENT D'UN NOUVEL ESSAI DE CARACTERISATION DE L'ERODABILITE DES SOLS - LE « WHEEL EROSION TEST » (WET)

DEVELOPMENT OF A NEW SUBMERSIBLE TEST TO CHARACTERISE THE EROSION OF SOILS – THE WHEEL EROSION TEST

Ousseynou NDOYE¹, Christophe CHEVALIER¹, Philippe REIFFSTEK¹, Sonia FANELLI¹, Carlos MINATCHY¹, Damien PHAM-VAN-BANG²

¹ Université Paris-Est, IFSTTAR, GERS, SRO, Marne-la-Vallée, France

² Université Paris-Est, Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, ENPC, EDF R&D, CEREMA, Chatou, France

RÉSUMÉ – Les mécanismes d'érosion et d'affouillement sont des sujets très complexes. Pour améliorer la caractérisation de ces phénomènes, un nouvel essai, le « Wheel Erosion Test », a été développé. Il consiste à faire tourner une roue au dessus d'un lit de sédiments. A partir d'une contrainte seuil, une fosse d'érosion est observée et ses dimensions peuvent être mesurées par des méthodes acoustiques ou optiques.

ABSTRACT – The mechanism of the scour process is a most challenging subject. To improve its understanding, a new test, the Wheel Erosion Test (WET), was developed. It consists in a wheel rotating upon a layer of sediments. If the stress produced by the wheel is sufficient, grains are eroded and a scour hole is observed. The dimensions of the scour hole can be characterized by video camera and acoustic measurements.

1. Introduction

Les ouvrages d'art en milieu aquatique peuvent être menacés par des phénomènes érosifs, c'est notamment le cas des piles de ponts soumis à l'affouillement sous l'effet d'efforts hydrodynamiques qui peuvent être variables ou continus (Briaud, 2008). A terme, l'affouillement peut impacter la capacité portante de l'ouvrage et mener à sa ruine. Cependant les mécanismes en jeu dans ce processus érosif sont très difficiles à évaluer, surtout à l'échelle réelle (Delancret, 2015).

Plusieurs dispositifs, comme les érodimètres à jets (Hanson, 2004 ; Reiffsteck *et al.*, 2012), l'«Erosion Function Apparatus» (Briaud *et al.*, 2001) ou le «Hole Erosion Test» (Chevalier *et al.*, 2010 ; Haghghi *et al.*, 2013 ; Wan et Fell, 2004) ont été développés pour mesurer l'érodabilité d'un sol. Cependant, la transposabilité des résultats d'essais en laboratoire aux sites réels s'avère délicate. Les essais en laboratoire utilisent des sollicitations tangentielles bien contrôlées mais ne sont pas exploitables sur site tandis que les essais de terrain (plus simples) utilisent généralement des jets perpendiculaires au sol peu représentatifs des phénomènes naturels. Une étude récente (Jerez Loaiza, 2012) a par ailleurs montré qu'il n'existe pas de méthode pour simuler les propriétés d'un sédiment cohésif réel en laboratoire et qu'il est préférable de faire, dans un premier temps, les mesures en laboratoire pour connaître le comportement des sédiments et, ensuite, de faire les expériences directement sur site pour avoir les caractéristiques réelles d'érosion.

Pour surmonter ces difficultés, il a été conçu un nouveau dispositif, le « Wheel Erosion Test » (WET – essai d'érodimètre de roue). Cet essai permet de générer une sollicitation tangentielle à l'interface et d'obtenir des observations et des mesures précises du

phénomène d'érosion dans des conditions contrôlées de laboratoire tout en étant transposable et utilisable dans les conditions réelles du terrain.

2. Développement du prototype

2.1. Principe de l'essai

Afin de quantifier les diverses contraintes qu'il convient de prendre en compte pour concevoir un dispositif de terrain, les premiers essais sont réalisés sans courant ambiant en présence d'une érosion due uniquement à la rotation d'un mobile cylindrique (la roue) tournant selon un axe horizontal au dessus d'un lit sédimentaire dans un aquarium rempli d'eau douce. La vitesse de rotation de la roue et sa distance par rapport à la surface du sol sont contrôlables. La rotation de la roue entraîne le fluide ambiant et induit ainsi une contrainte tangentielle sur l'interface eau-sédiment. Lorsque cette contrainte est suffisante une mise en mouvement des particules du lit provoque l'apparition d'une fosse d'érosion. Les dimensions géométriques de celle-ci (longueur, largeur, profondeur) sont mesurées. Elles permettront de calculer le volume érodé et par conséquent la masse de sol correspondante et donc d'établir une loi macroscopique d'érosion. Cette loi pourra être, par la suite, affinée pour donner lieu à une loi plus locale exprimant l'écoulement en terme de contrainte de cisaillement.

2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé dans cette étude est illustré par la Figure 1. Il se compose des éléments suivants :

- un aquarium de 120 cm de longueur, de 50 cm de largeur et de 50 cm de hauteur, rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 41 cm et, dans la présente étude, de 7 cm de sable de Fontainebleau ;
- une structure constituée d'un assemblage de profilés en aluminium : un bâti et un bras mobile sur l'axe vertical descendant ZZ' . Le bras mobile supporte une roue de diamètre 10 cm et de largeur 13 cm, et est relié à une manivelle qui permet de régler la distance initiale (H_i) entre la roue et le lit sédimentaire ;
- un moteur de marque DMX-UMD monté sur la structure en aluminium et connecté à un ordinateur afin de piloter la vitesse à la périphérie de la roue (V_R) grâce à un logiciel dédié ;
- un niveleur intégré sur la structure qui permet de réaliser une surface plane du lit sédimentaire initial.

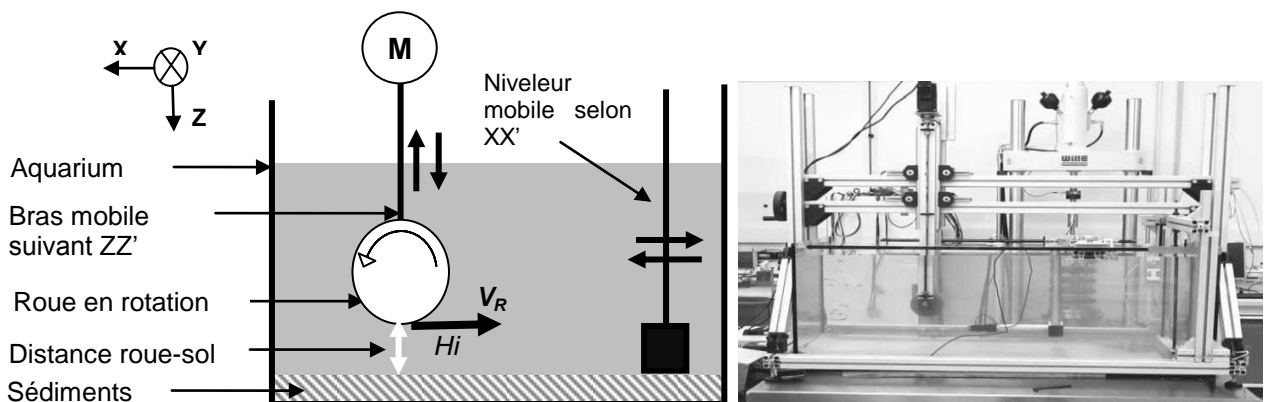


Figure 1. Schéma du dispositif (à gauche) ; vue d'ensemble (à droite).

2.3. Méthodes de mesure

Si la vitesse de rotation de la roue est assez importante pour provoquer une modification du relief de la surface de sédiments, deux méthodes sont utilisées pour effectuer les relevés bathymétriques : une méthode acoustique et une méthode optique. Ces relevés se font une fois la rotation de la roue arrêtée et le bras mobile relevé.

2.3.1. Méthode optique

La méthode optique (Figure 2) consiste à projeter une nappe laser, sur le lit et à enregistrer la ligne projetée $L(t)$ avec une caméra frontale. Cette ligne $L(t)$ est ensuite comparée à la projection initiale L_0 qui correspond à l'état initial du lit (relief plat).

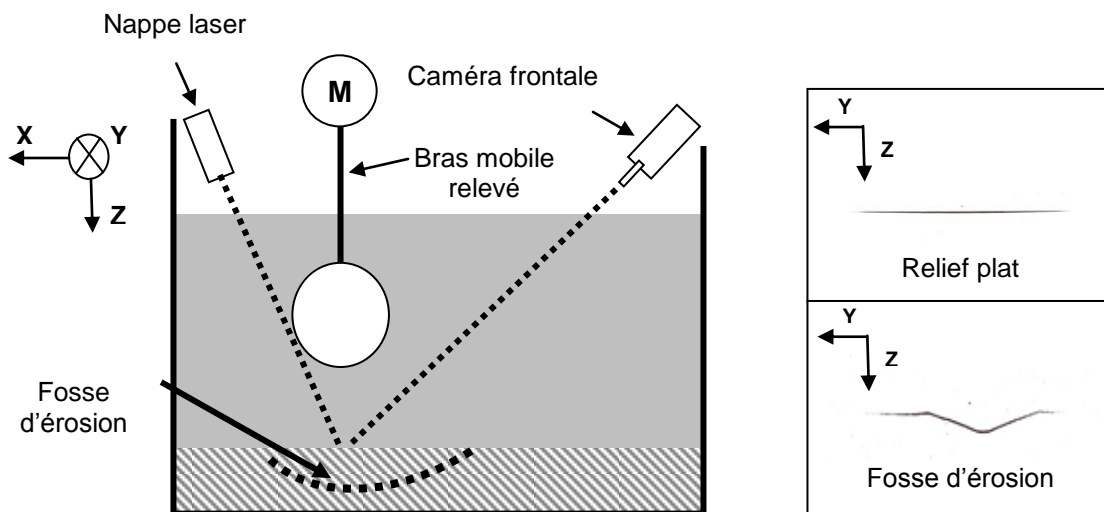


Figure 2. Schéma du dispositif de suivi par la méthode optique.

2.3.2. Méthode acoustique

La méthode acoustique (Figure 3) consiste à utiliser le temps de vol d'une onde acoustique, connaissant sa célérité dans l'eau, pour calculer une distance.

Le principe en est le suivant. Un générateur de fréquence crée une énergie électrique, qui excite une sonde ultrasonore. Cette énergie électrique est alors transformée en énergie acoustique, laquelle se propage dans l'eau jusqu'à la surface du lit où elle est réfléchiée en direction de la sonde. La sonde est utilisée comme émetteur et récepteur. Elle transforme l'énergie acoustique reçue en énergie électrique. L'oscilloscope est utilisé pour visualiser les signaux (à l'émission et à la réception) qui se matérialisent par deux pics. Le temps de vol (t_v) de l'onde correspond à l'intervalle entre ces pics. Par conséquent, connaissant la célérité de l'onde acoustique (c_{ac}) dans l'eau, il est possible de calculer la distance sonde sédiment (d_{ss}) en un point (x,y) en soustrayant la distance sonde sédiment initiale (d_{ss0}).

$$d_{ss} = \frac{c_{ac} * t_v}{2} ; h_f(x, y) = d_{ss}(x, y) - d_{ss0}$$

La sonde est fixée sur un support permettant un déplacement selon les axes longitudinal XX' et transversal YY' . De ce fait, il est possible de faire un système de maillage pour reconstituer toute la fosse d'érosion.

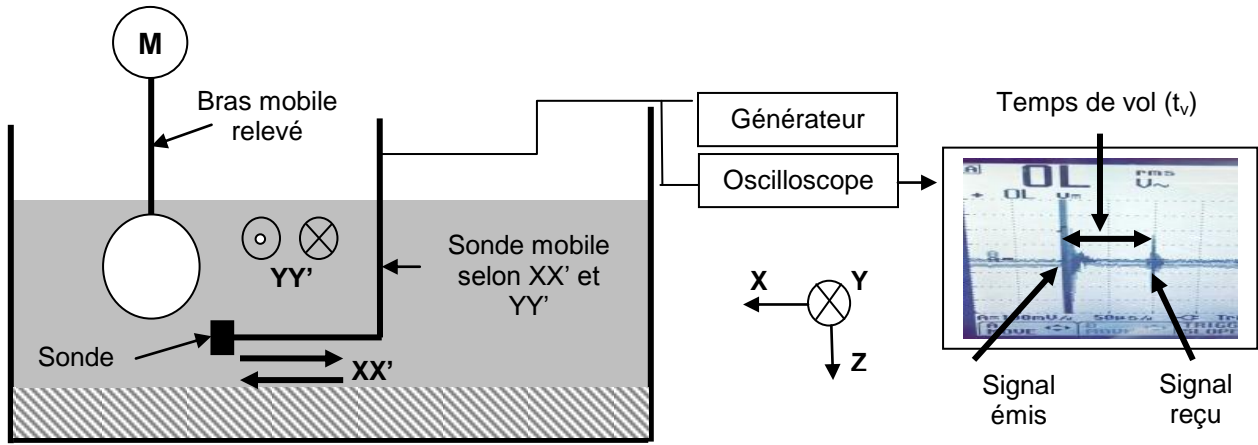


Figure 3. Schéma du dispositif de suivi par la méthode acoustique.

2.4. Protocole et campagnes d'essais

2.4.1. Mise en place du matériau

Dans le cadre de cette première étude, le sable de Fontainebleau est mis en place par pluviation afin d'éviter de créer des vides dans le lit de sédiment. Ce sable étant mono-disperse (Figure 4), les particules sédimentent à la même vitesse et se déposent les unes au-dessus des autres pour former un sol homogène. Une fois le matériau en place, plusieurs passages du niveleur sont effectués pour aplatir et uniformiser le relief du sol. Dans le cas de matériaux cohésifs (non traité ici), la préparation se fait à l'avance dans des bacs qui sont placés dans l'aquarium vide puis le niveau d'eau est ajusté.

Ensuite la roue est mise en place à la distance initiale (H_i) choisie puis l'essai d'érosion est lancé à une certaine vitesse. Selon le protocole utilisé, la roue est arrêtée et remontée au maximum une ou plusieurs fois au cours de l'essai, pour effectuer les mesures acoustiques et optiques.

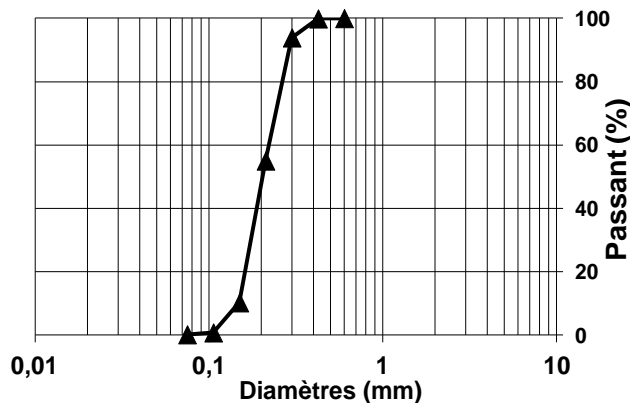


Figure 4. Courbe granulométrique du sable de Fontainebleau.

2.4.2. Campagnes d'essai

Trois types d'essais sont utilisés : les essais en régime quasi permanent (ERP), les essais par paliers de temps (EPT) et les essais par paliers de vitesses (EPV).

Un ERP est un essai pendant lequel la distance initiale (H_i) et la vitesse en périphérie de la roue (V_R) restent constantes pendant toute la durée de l'essai (20 minutes).

Un EPT est un essai durant lequel la roue est arrêtée et relevée à des instants fixes, $t = \{1\text{min}, 2\text{min}, 5\text{min}, 10\text{min}, 20\text{min}\}$, pour effectuer les relevés bathymétriques intermédiaires puis descendue à la même position et relancée à la même vitesse.

Un EPV est une succession d'essais sans remise à niveau initial du lit et avec une vitesse de rotation qui croit par paliers toutes les 20 minutes. Des relevés bathymétriques sont effectués après chaque palier.

Sur le sable de Fontainebleau, un essai par paliers de temps, un essai par paliers de vitesses et plusieurs essais en régime quasi permanents avec des distances initiales roue-sol (H_i) égales à 0,5 cm, 1cm et 2 cm ont été réalisés.

Le Tableau 1 présente l'ensemble des essais jusqu'ici effectués.

Tableau 1. Essais effectués sur le sable de Fontainebleau.

Type d'essai	distance roue-sol H_i (cm)	vitesse de rotation (tr/min)	vitesse V_R (m/s)	Durée de l'essai (min)
ERP	0,5	60	0,31	20
ERP	0,5	90	0,47	20
ERP	0,5	120	0,62	20
ERP	0,5	150	0,78	20
ERP	1	90	0,47	20
ERP	1	120	0,62	20
ERP	1	150	0,78	20
ERP	2	90	0,47	20
ERP	2	120	0,62	20
ERP	2	150	0,78	20
EPT	0,5	150	0,78	1-2-5-10-20
EPV	0,5	60-90-120-150	0.31/ 0,47/ 0,62/ 0.78	4 x 20

3. Résultats

3.1. Topographie des fosses d'érosion

Quand la vitesse à la périphérie de la roue (V_R) est assez importante pour provoquer un transport sédimentaire, une fosse d'érosion peut être observée (Figure 5). Elle est associée à deux zones de dépôts situées respectivement en amont et en aval. Le dépôt (ou dune) en aval est beaucoup plus volumineux que le dépôt en amont. Dans le plan transversal, la symétrie est observée par rapport au plan XZ situé au milieu du cylindre.

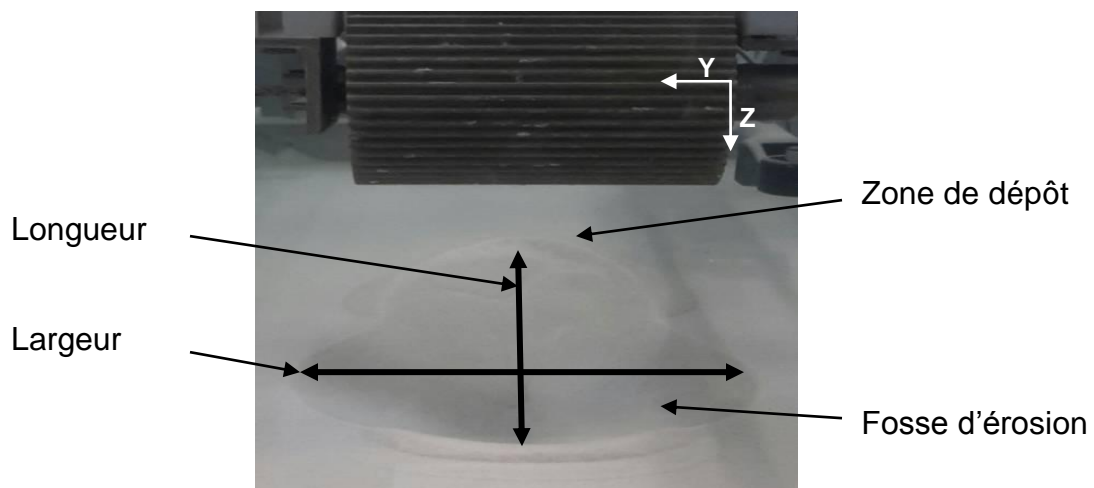


Figure 5. Fosse d'érosion obtenue avec $V_R = 0,47$ m/s avec $H_f = 0,5$ cm.

3.2. Analyses et interprétations des résultats

3.2.1. Résultats acoustiques détaillés

La Figure 6 présente différents relevés topographiques obtenus par méthode acoustique. Elle met en évidence l'influence de la distance initiale (H_i) sur la géométrie de la fosse d'érosion pour une même vitesse (V_R). Les dimensions de la fosse d'érosion et celles de la zone de dépôt diminuent avec l'augmentation de (H_i). La roue étant plus éloignée du sol, cela correspond à une diminution des contraintes exercées par le fluide en écoulement sur la surface du sol.

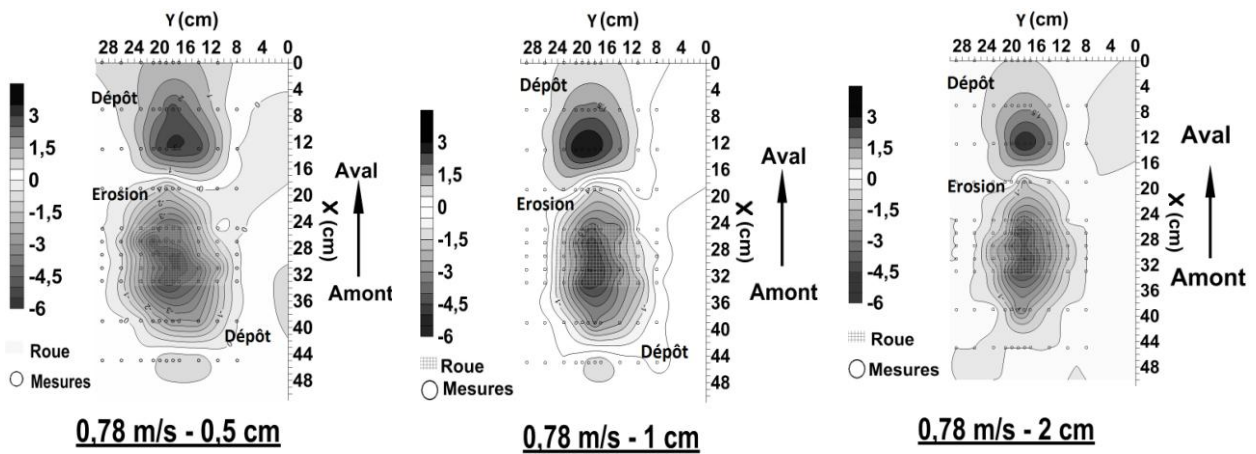


Figure 6. Bathymétrie des fosses d'érosion obtenues avec $V_R = 0,78$ m/s.

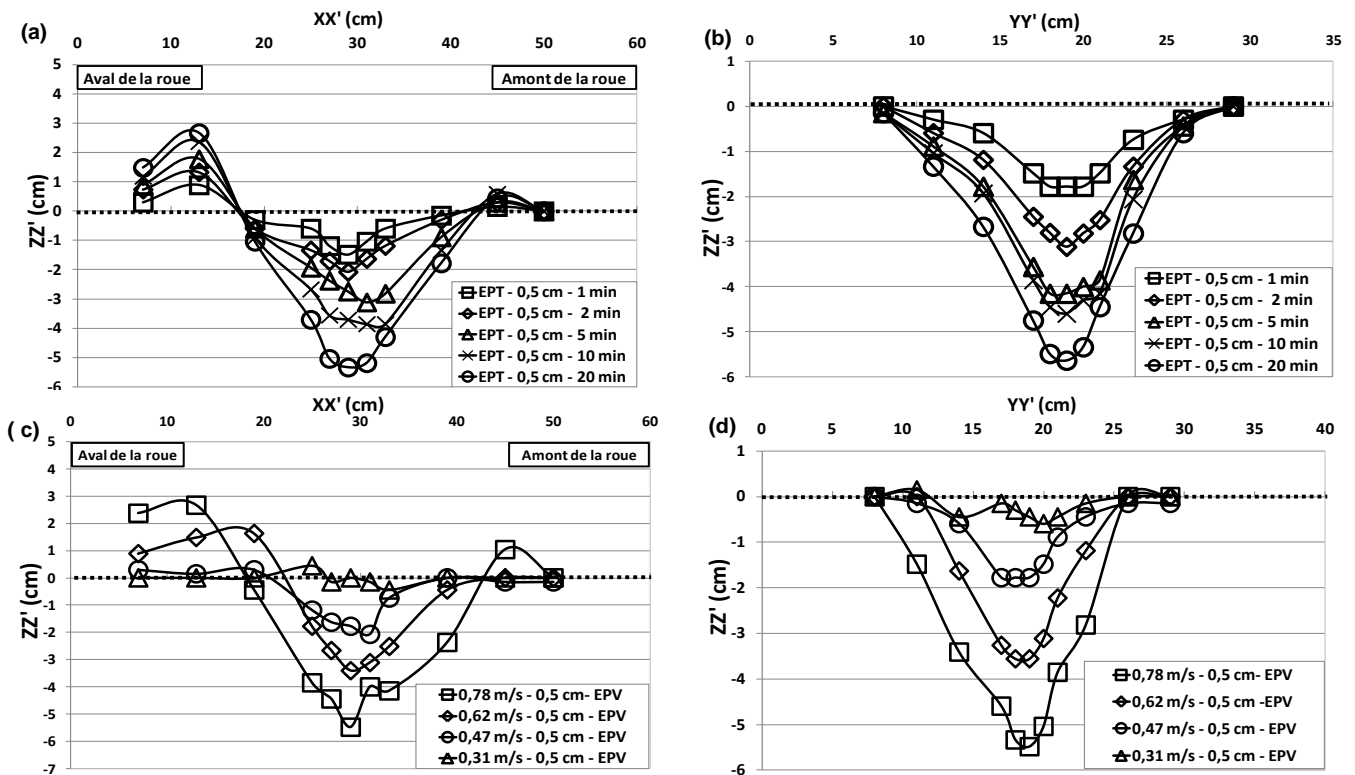


Figure 7. Résultats de la méthode acoustique.

La Figure 7 présente les profils des fosses d'érosions obtenus grâce à la méthode de suivi acoustique suivant les plans verticaux XX' (plan de rotation de la roue) et YY' (plan de l'axe horizontal de la roue).

Les courbes (a) et (b) montrent l'évolution des dimensions de la fosse d'érosion pour une vitesse (V_R) et une distance initiale (H_i) constantes, avec des interruptions à 1, 2, 5, 10 et 20 minutes pour prendre des mesures. Les courbes (c) et (d) présentent l'essai par paliers de vitesse. Elles mettent en évidence l'augmentation des dimensions de la fosse dans les trois plans XX', YY' et ZZ' ainsi que l'évolution de sa forme en fonction du temps (a et b) et de l'augmentation des sollicitations (c et d).

La pente observée au niveau des fosses d'érosion suivant les plans verticaux XX' et YY' augmente avec la vitesse (V_R). Pour $V_R > 0.62$ m/s, elle est voisine de l'angle de frottement du sable utilisé (env. 30-35°) et correspond ainsi à un maximum. Lors des essais aux plus fortes vitesses (lorsque la fosse d'érosion est également la plus profonde), il est ainsi observé des pentes plus importantes que l'angle de frottement. Juste après l'arrêt de la roue, de petites avalanches se produisent mais elles ne modifient pas substantiellement la géométrie observée de la fosse.

3.2.2. Comparaison des résultats optiques et des résultats acoustiques.

La Figure 8 présente d'une part les profondeurs et largeurs calculées à partir des mesures optiques (déviations-déformations de la ligne laser) et d'autre part les résultats des mesures acoustiques pour les trois campagnes d'essais en continu (pour $H_i = 0.5, 1$ et 2 cm). Les comparaisons sont satisfaisantes bien qu'une analyse plus détaillée soit nécessaire.

Les courbes (a) et (b) de la Figure 8 montrent une augmentation des dimensions de fosses d'érosion d'une part en fonction de la vitesse en périphérie de la roue (V_R) et d'autre part en fonction de la distance initiale (H_i). Pour une vitesse de 0,31 m/s et une distance initiale (H_i) supérieure à 0,5 cm il n'y a pas d'érosion, ce qui montre l'existence d'un seuil d'érosion.

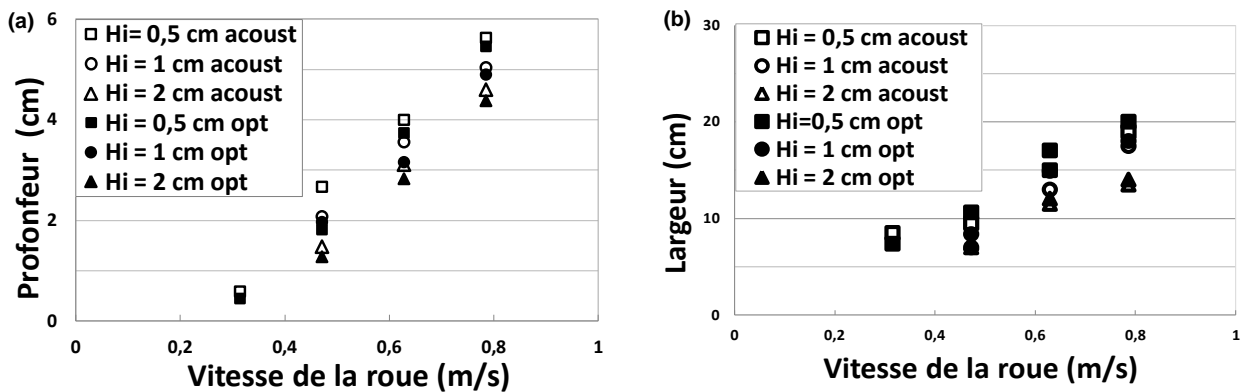


Figure 8. Synthèse des résultats : comparaison des méthodes optique et acoustique.

4. Conclusion et perspectives

Les résultats présentent un fort potentiel pour développer une loi macroscopique d'érosion, laquelle prendra en compte la relation entre la variation de la vitesse (V_R) et la distance initiale (H_i). En effet, l'écoulement généré par le dispositif permet selon (V_R) et (H_i) d'éroder ou non un sol immergé. Lorsqu'une érosion est produite, la quantité de sédiments érodée augmente avec la vitesse de l'écoulement. Ainsi le dispositif permet de tester la sensibilité d'un matériau vis-à-vis de l'érosion. Cependant pour le démontrer, et

ainsi valider le dispositif WET, il convient à ce stade de développer un modèle afin de calculer la contrainte imposée par l'écoulement à l'interface avec le sol.

Aussi, les résultats des essais par paliers de temps sont quasi identiques avec ceux des essais en régime quasi permanent malgré une discontinuité au niveau de la sollicitation, ce qui tend à prouver la robustesse du dispositif. En effet, en étudiant la progression des dimensions de la fosse d'érosion les deux méthodes de mesure donnent des résultats quasi identiques

La présente étude a été réalisée essentiellement sur un matériau non cohésif sans courant ambiant. La prochaine étape des essais concerne d'abord les sols cohésifs (mélange sable de Fontainebleau – Kaolinite armoricaine). Pour tester la robustesse du dispositif WET, il est nécessaire de commencer par des matériaux connus de par leurs propriétés, faciles à manier de manière à limiter d'éventuelles incertitudes. Ensuite le dispositif sera modifié de telle sorte qu'il soit utilisable dans un canal. Le but étant de faire des essais WET en ayant un écoulement permanent autour de la roue. Cette modification permettra d'étudier l'impact qu'aurait un écoulement ambiant sur la fosse d'érosion.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le Laboratoire Eau Environnement et Frédérique Larrarte pour l'aide précieuse apportée à l'instrumentation de l'essai et à la préparation de la communication.

Le présent travail a bénéficié de l'aide de l'Agence Nationale de la Recherche au travers du programme ANR-14-CE03-0011 – SSHEAR « Sols, Structures et Hydraulique : Expertise et Recherche Appliquée ».

6. Références bibliographiques

- Briaud J.L., Ting F.C.K., Chen H.C., Cao Y., Han S.W., Kwak K.W. (2001). Erosion function apparatus for scour rate predictions. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, 127(2), pp. 105-113.
- Briaud J.L. (2008). Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, 134(10), pp. 1424-1447.
- Chevalier C., Haghghi I., Pham T.L., Reiffsteck, P. (2010). Two Complementary Tests for Characterizing the Soil Erosion. *Fifth International Conference on Scour and Erosion, San Francisco, USA*, pp. 152-161.
- Delancret R. (2015). Affouillement autour des ouvrages d'arts : analyse bibliographique et application au pont de l'A10 à Tours. Rapport de stage M2, Univ. Rabelais, Tours, 61p.
- Haghghi I., Chevalier C., Duc M., Guédon S., Reiffsteck P. (2013). Improvement of Hole Erosion Test and Results on Reference Soils. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, 139(2), pp. 330-339.
- Hanson G. J. (2004), Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in-situ. *Applied Engineering in Agriculture, ASAE.*, 20 (4), pp.455-462.
- Jerez Loaiza A. (2011). Etude et suivi de l'érosion des sédiments en contexte immergé. Mémoire de fin d'études, INSA Rennes, 66p.
- Reiffsteck P., Haghghi I., Chevalier C. (2012). Erodibility diagnostic of existing hydraulic earthworks by Mobile Jets Erosion Test. *Sixth International Conference on Scour and Erosion, Paris, France*, pp. 1105-1112.
- Wan C.F., Fell R. (2004). Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, 30(4), pp. 373-380.