

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Compréhension et maîtrise des risques d'affouillements : développements récents

Understanding and control of scour phenomena: recent advances

Christophe Chevalier, Frédérique Larrarte, Franziska Schmidt

Ifsttar, GERS – MAST, Marne-la-Vallée & Bouguenais, France, christophe.chevalier@ifsttar.fr

Damien Pham-Van-Bang, Edouard Durand

Cerema, Laboratoire St Venant & DTer NC, Chatou & Blois, France

Philippe Gondret

Laboratoire FAST, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

Sidoine de la Roque

Vinci Autoroutes, Dir. Op. Infrastructure, Saran, France

Mark Cheetham

SNCF Réseau, Dir. Ingénierie et projets, La Plaine St Denis, France

Mohsen Hosseingholian

IRT Railenium, Famars, France

RÉSUMÉ : Les processus d'affouillement sont une cause importante de destruction des constructions (ouvrages d'art, ouvrages en terre et bâtiments) notamment lors des crues majeures. La prise en compte de ces phénomènes d'érosion reste trop empirique, notamment parce qu'ils sont particulièrement complexes et font intervenir de nombreux champs disciplinaires : mécanique des sols, des fluides, des structures... Dans la perspective de dépasser cet empirisme, d'avancer sur l'amélioration des connaissances et finalement d'améliorer les méthodes de diagnostic, d'alerte et de gestion, le projet SSHEAR (« Sols, Structures et Hydraulique : Expertise et Recherche Appliquée ») met en synergie les compétences de 6 partenaires avec le soutien de l'ANR (« Agence Nationale de la Recherche »). Dans cette communication, après une présentation du projet, un premier bilan des résultats obtenus depuis le démarrage en 2015 est proposé : développements expérimentaux, modélisation numérique, observations de terrain.

ABSTRACT: The scouring process represents a significant contributing factor in the destabilising and destruction of civil structures (bridges, earth embankments and buildings) during major flood events, yet our understanding of the mechanisms involved remains highly empirical. These erosion phenomena are especially complex and involve many disciplines like soil mechanics, fluid mechanics or structural mechanics... To overcome this reliance on empiricism, while building general knowledge and proposing optimised methods aimed at diagnostics, advanced warning procedures and infrastructure management, a consortium comprising six complementary Partners has been formed within the project SSHEAR ("Soils, Structures and Hydraulics: Expertise and Applied Research") financially supported by the French National Research Agency (ANR). In this paper, after a presentation of the project, a first assessment of the results achieved since the project started in 2015 is proposed: experimental developments; numerical modelling; feedback in the field.

MOTS-CLES : Erosion et affouillements, Risques hydrau fluviaux ou côtiers, Essais en labo, Modélisation num./phys., Monitoring

KEYWORDS: Scour and erosion, Coastal and fluvial hazards, Lab testing, Num/phys modeling, Monitoring

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 soumises à l'affouillement sous l'effet d'efforts hydrodynamiques qui peuvent être permanents ou intermittents (Briaud, 2008). A terme, l'affouillement peut impacter la capacité portante de l'ouvrage et mener à sa ruine. Or les mécanismes en jeu dans ce processus érosif sont très difficiles à évaluer, surtout à l'échelle réelle (Delancret 2015).

Dans ce domaine, le contexte est d'un côté celui d'une expertise scientifique et technique peu structurée au niveau français nécessitant une réactualisation et d'un autre celui d'une expertise internationale (ICSE 2002 à 2016) essentiellement fondée sur des connaissances empiriques. Le rapport "Evaluation of Bridge-Scour Research" (Sturm *et al.* 2011) souligne le besoin critique d'une part d'expérimentations hydrauliques en laboratoire et de modèles pour améliorer la compréhension des processus d'affouillements au contact des structures, et d'autre part la nécessité d'étude in-situ et de dispositif de monitoring à demeure pour évaluer les

phénomènes, notamment pendant les crues, évaluer les incertitudes des mesures et caler les modèles.

En France, depuis environ 30 ans (Effondrement du Pont Wilson en 1978) la politique de surveillance et de maintenance préventive et corrective des ouvrages ferroviaires et routiers a été renforcée. Dans le cas du patrimoine ferroviaire, il existe ainsi un recensement exhaustif du patrimoine d'infrastructures établies en site aquatique. Les principes d'organisation de la surveillance sont déclinés en différentes actions de visites d'inspection périodiques des ouvrages, d'actions associées d'analyse et de diagnostic, de surveillance renforcée basée sur la mise en œuvre ponctuelle d'instrumentations et/ou d'investigations notamment bathymétriques. Il n'existe cependant pas rigoureusement de classification de sensibilité.

Pour dépasser cet empirisme, avancer sur l'amélioration des connaissances et proposer des méthodes optimisées de diagnostic, d'alerte et de gestion, le projet SSHEAR (« Sols, Structures et Hydraulique : Expertise et Recherche Appliquée », a pour objectif l'amélioration des connaissances sur les mécanismes d'affouillement et le développement d'outils novateurs d'observation et de modélisation aux échelles tant de

maquettes expérimentales que d'ouvrages de taille réelle en vue de proposer des méthodes de diagnostic, d'alerte et de gestion.

Une présentation du projet sera faite (partie 2) avant d'en illustrer les premiers résultats expérimentaux et numériques (partie 3) et les études préliminaires de terrain (partie 4).

2 PRESENTATION DU PROJET « SSHEAR »

Le projet SSHEAR, démarré en 2015 pour 4 ans avec le soutien de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche), propose une démarche pluridisciplinaire originale dans le domaine des affouillements.

Six partenaires constituent le consortium et apportent, chacun dans leurs domaines respectifs, leurs expertises scientifiques, leurs compétences techniques et leurs expériences complémentaires : mécaniciens des sols et des fluides ancrés dans la pratique (Ifsttar), géotechniciens de terrain, hydrauliciens, sédimentologues (Cerema), physiciens et mécaniciens (UMR FAST), gestionnaires d'infrastructures routières (Cofiroute) et ferroviaires (SNCF Réseau) et institut de recherche technologique (Railenium).

Le projet est articulé en 4 tâches : Gestion, coordination et valorisation ; Approche « Modèle » ; Approche « Terrain » ; Phase « Appropriation » par les gestionnaires.

Les produits finaux du projet seront entre autres :

- des dispositifs d'essais spécifiques pour étudier en laboratoire l'affouillement et l'érosion des matériaux ;
- des canaux de mesure instrumentés à la fois sur le plan hydraulique et sur le plan mécanique des sols ;
- des outils pour mieux caractériser les sites affouillables ;
- un ensemble de paramètres de suivi in situ bien documenté pour un ou plusieurs sites ;
- des développements numériques pour une modélisation hydro-sédimentaire 3D, de type biphasique ;
- des guides à destination des praticiens et des gestionnaires,
- des publications scientifiques...

Certains résultats attendus au cours du projet sont illustrés à la suite, en particulier pour un nouveau dispositif d'essais.

3 DEVELOPPEMENTS EXPERIMENTAUX ET NUMERIQUES

Dans le cadre de la tâche 2, de nombreux travaux expérimentaux et des développements numériques sont prévus. Ils incluent notamment des études modèles (Badr *et al.* 2016) et le développement d'un nouvel érodimètre capable de mesurer la sensibilité à l'érosion en conditions immergées.

2.1 WET : dispositif d'essais et résultats expérimentaux

2.1.1 Contexte

Plusieurs dispositifs, comme les érodimètres à jets (Reiffsteck *et al.* 2012), l'« Erosion Function Apparatus » (Briaud *et al.* 2001) ou le « Hole Erosion Test » (Haghighi *et al.* 2013) 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 (Jerez Loaiza 2012).

Pour surmonter ces difficultés, un nouveau dispositif, le « Wheel Erosion Test » (WET – essai d'érosion de roue) a été conçu (Ndoye *et al.* 2016). Il consiste à faire tourner une roue (un cylindre) sur un lit de sédiments, le tout étant immergé dans un aquarium. A partir d'une contrainte seuil, une fosse d'érosion est observée et ses dimensions peuvent être mesurées.

2.1.2 Dispositif d'essais

La Figure 1 illustre le prototype WET. La rotation du cylindre (10 cm de diamètre, 13 cm de longueur, axe horizontal) est commandée par un moteur monté sur un cadre en acier. Les paramètres de contrôle sont la distance initiale H_i entre la roue et le lit plan et la vitesse V_r à la périphérie de la roue (contrôlée par ordinateur).

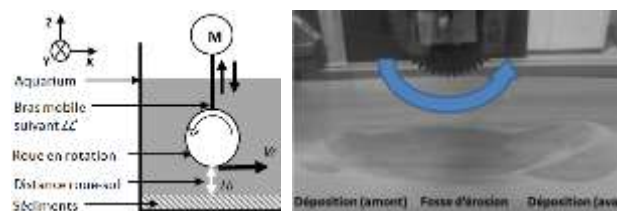


Figure 1. Schéma du dispositif et figure d'érosion (roue soulevée après essai).

L'évolution de la surface du lit sédimentaire est suivie par mesures optiques (non présentées ici) et/ou par mesures acoustiques, les deux types de mesures donnant des résultats similaires. Ainsi, la méthode acoustique consiste à utiliser le temps de vol sur le trajet aller-retour d'une onde sonore (un pulse) entre une sonde et la surface de sédiments au dessous et à la verticale de cette sonde pour calculer la distance. La sonde, fixée sur un support mobile, permet de faire un maillage pour reconstituer toute la fosse d'érosion (Ndoye *et al.* 2016).

2.1.3 Campagne expérimentale

Dans la première étude menée, le lit sédimentaire est constitué de sable de Fontainebleau, matériau très uniforme avec un diamètre moyen égal à 0,2 mm. Le lit est préparé par la méthode reproductible de la pluviation.

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 position de la roue (distance initiale H_i) et la vitesse en périphérie de la roue (V_r) restent constantes pendant toute la durée de l'essai (fixée à 20 minutes). Un EPT est un essai à H_i et V_r fixés 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 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 croît par paliers toutes les 20 minutes. Des relevés sont effectués après chaque palier.

2.1.4 Résultats

La Figure 2 présente différents relevés topographiques obtenus par méthode acoustique dans des essais de type ERP. 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 haute, cela correspond à une diminution des contraintes exercées par le fluide en écoulement sur la surface du sol.

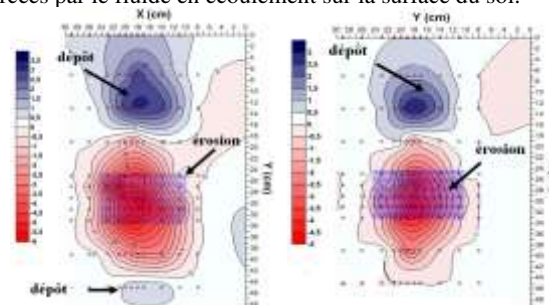


Figure 2. Relevés topographique des fosses d'érosion obtenus avec (ERP $H_i = 0,5\text{cm}$; $V_r = 0,78\text{m/s}$) et (ERP $H_i = 2\text{cm}$; $V_r = 0,78\text{m/s}$). L'écoulement est orienté vers le haut des figures. L'emplacement de la roue est indiqué en pointillés bleus.

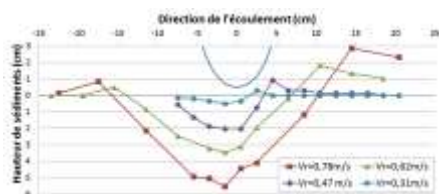


Figure 3. Résultats d'essais en fonction de la vitesse en périphérie de la roue (ERP $H_i = 0,5\text{cm}$; V_r de 0,31 à 0,78m/s).

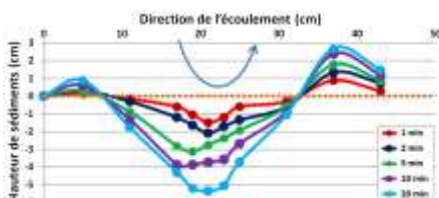


Figure 4. Résultats typique d'essais en fonction du temps (EPT $H_i = 0,5\text{cm}$; $V_r = 0,78\text{m/s}$).

A partir de ces relevés topographiques, il est possible d'extraire différents profils de la fosse d'érosion. La Figure 3 montre les profils de la fosse d'érosion dans la direction de l'écoulement pour une distance initiale constante ($H_i = 0,5\text{cm}$) et différentes vitesses ($V_r = 0,31$ à $0,78\text{m/s}$). Ces profils ont été obtenus lors d'essais de type ERP. Ils illustrent l'augmentation des dimensions de fosses d'érosion pour une vitesse en périphérie de la roue croissante, correspondant à une augmentation des contraintes exercées par le fluide en écoulement sur la surface du sol.

La Figure 4 illustre un résultat typique d'un essai de type EPT : le développement temporel de la fosse d'érosion pour une distance initiale $H_i = 0,5\text{cm}$ et une vitesse constante $V_r = 0,78\text{m/s}$.

Dans l'ensemble, les résultats des essais à partir des différents scénarii de sollicitation (ERP, EPT, EPV) sont comparables car ils fournissent des résultats finaux similaires à pour les paramètres (H_i , V_r) donnés.

2.1.5 Discussion

Ces premiers résultats présentent un fort potentiel en vue de l'obtention d'une loi macroscopique d'érosion à partir des essais. D'une part, l'écoulement généré par le dispositif permet selon (V_r) et (H_i) d'éroder ou non un sol immergé. D'autre part, lorsqu'une érosion est produite, la quantité de sédiments érodés augmente avec la sollicitation exercée par l'écoulement (vitesse V_r importante ou hauteur H_i faible). Pour développer cette étape indispensable d'interprétation, il convient de développer un modèle afin de calculer la contrainte imposée par l'écoulement à l'interface avec le sol. Dans cet objectif, un premier modèle numérique est en développement.

2.2 WET : modèle numérique

Un modèle numérique d'écoulement à deux phases a été développé et permet de reproduire les essais du WET (Pham Van Bang *et al.* 2016). Reposant sur la formulation mathématique de Drew et Lahey (1993), il utilise une description Euler-Euler pour le système fluide-particule.

Le modèle est expliqué en détail dans Nguyen *et al.* (2009, 2012). Il a été récemment amélioré pour tenir compte de la transition solide/liquide pour la phase granulaire (solide). Cette transition est essentielle pour décrire à la fois le régime « solide » dans la région non-érodée et le régime « liquide » dans la région érodée. La transition est automatiquement calculée en considérant une contrainte élastique pour un régime « solide », et une contrainte visqueuse (ou turbulente) pour le régime « liquide ». Un critère basé sur le paramètre de Shield est utilisé pour lisser la transition entre les régimes. Les critères

et ces paramètres sont validés sur un cratère érodé lors d'un essai d'érosion par jet vertical et submergé.

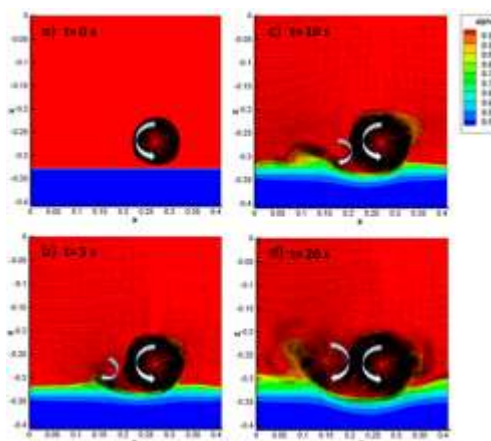


Figure 5. Résultats d'une simulation 2D ($H_i = 1\text{cm}$; $V_r = 0,78\text{m/s}$).

Des résultats typiques de simulation sont illustrés à la Figure 5. Ils reproduisent qualitativement bien ce qui est observé expérimentalement (Fig. 2, 3 et 4) et permettent d'évaluer les phénomènes hydrodynamiques en jeux, avec, notamment la présence d'un tourbillon principal (roue tournante) et d'un tourbillon secondaire potentiellement responsable du dépôt de sédiment amont (Fig. 1).

4 ETUDES DE TERRAIN

Un enjeu important de la tâche 3 est le suivi de sites subissant des phénomènes d'affouillement. Afin d'aller vers des résultats les plus à même de contribuer à une doctrine publique et d'apporter des réponses aux gestionnaires (via les guides techniques), un point essentiel a été la sélection de sites 'pilotes', leur reconnaissance et leur suivi.

4.1 Sélection des sites

Des critères précis ont été définis et utilisés pour sélectionner les sites 'pilotes' : structure (type de pont et représentativité, type de piliers, ...), cours d'eau (hydrographie, hydraulique, hydro-morphologie, nature des sédiments ...), géologie et géotechnique (présence de roche, type de fondations, présence de renforts ...), accessibilité... Bien sûr, l'un des premiers critères était l'observation d'affouillements.

Une classification assez exhaustive des ponts a d'abord été effectuée par les gestionnaires du projet, en utilisant des bases de données et des SIG. Une sélection de trois sites a ensuite été faite à partir d'une liste réduite (Larrarte *et al.* 2016) :

- le viaduc de l'A71 sur la Loire à Orléans est représentatif des ouvrages sur piles traversant les fleuves et les cours d'eau principaux dans la partie ouest de la France ;

- le pont du Moulègre (Fig. 6) est une structure à voûte unique de type cadre, très fréquemment utilisée sur le réseau secondaire ferroviaire mais également routier.

- le remblai-digue ferroviaire le long de l'Arve (Fig. 6), situé dans un méandre, est très répandu en France dans le sud et l'est.



Figure 6. Deux sites 'pilotes' : (à gauche) pont ferroviaire sur le Moulègre, (à droite) remblai-digue le long de l'Arve.

4.2 Premiers éléments de contexte – site de l'A71

Plusieurs campagnes de mesures expérimentales existent déjà pour le viaduc de l'A71 sur la Loire à Orléans. Cet ouvrage est, en effet, suivi avec des relevés bathymétriques réguliers depuis 1987 : des fosses d'affouillement y sont notamment actives au niveau des piles 3 et 4.

Les deux derniers relevés bathymétriques 2011 et 2016 (Bigot *et al.* 2012) ont montré (Fig. 7) que des processus sédimentaires actifs ont lieu : une fosse d'affouillement détectée en 2011 près de la pile 4 a été presque totalement comblée par des sédiments 5 ans plus tard.

Pour compléter ces mesures, de nombreuses informations ont été collectées sur l'ouvrage et son environnement : construction, hydraulique de la Loire, géologie, géotechnique...

En 2015, des prélèvements alluvionnaires ont été réalisés. Les analyses granulométriques sont représentées à la Figure 8. Les particules localisées sous ou à proximité des piles ont un D₅₀ entre 1 et 5mm correspondant à des sables et graviers. En amont, principalement sur la rive gauche, les dépôts alluvionnaires sont plus grossiers avec des blocs.

Un profileur de courant Doppler acoustique (ADCP) a également été utilisé, à la fin de 2015, pour obtenir des informations sur la distribution des vitesses dans le lit de la rivière. Par ailleurs, des premières mesures vibratoires sur l'ouvrage ont aussi été réalisées en 2016 (Boujia *et al.* 2016).

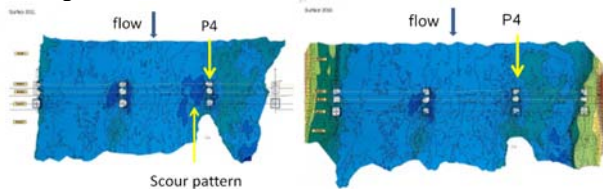


Figure 7. Relevés bathymétriques sur le site de l'A71 sur la Loire à Orléans : (à gauche) en mars 2011, (à droite) en mai 2016.

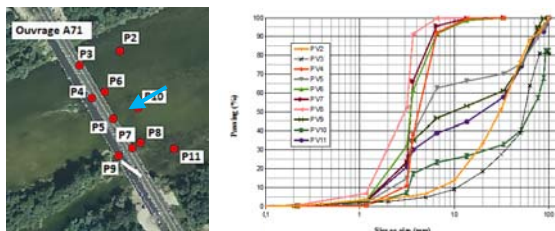


Figure 8. Prélèvements alluvionnaires : points de prélèvement et analyses granulométriques.

4.3 Développements envisagés

La comparaison des deux cartes de la Figure 7 souligne une évolution de la bathymétrie dépendant des sollicitations hydrauliques survenues entre ces 2 enquêtes : les cycles d'érosion-dépôt n'ont notamment pas pu être observés avec ces suivis ponctuels. Par conséquent, un suivi plus régulier voire en continu (monitoring) doit être mis en place pour mieux comprendre les phénomènes.

L'instrumentation est actuellement en développement. Afin de suivre les fosses d'affouillement, l'idée principale est d'avoir des campagnes bathymétriques régulières. Pour cela, en cas d'accès difficiles ou lors d'inondations, un drone nautique et son sondeur mono-faisceau seront utilisés. Les avantages / inconvénients de ces dispositifs seront étudiés avec attention.

Une instrumentation à demeure est également à l'étude. Elle inclura une surveillance continue de la vitesse et de la bathymétrie afin de quantifier la manière dont les sollicitations hydrauliques influent sur les fonds mobiles.

De nouveaux capteurs supplémentaires seront aussi déployés pour surveiller l'état de la structure, comme des accéléromètres pour suivre la fréquence propre de la structure et son évolution potentielle en lien avec les affouillements (Taylor *et al.* 2012).

5 CONCLUSION ET REMERCIEMENTS

Le projet SSHEAR propose une démarche pluridisciplinaire originale dans le domaine des affouillements par l'étude combinée des processus fondamentaux (en laboratoire) et l'étude sur site réel (incluant mesure et surveillance quasi-temps réel). En lien avec les gestionnaires impliqués dans le projet, les avancées obtenues devraient aider à une meilleure maîtrise des risques par une meilleure connaissance de l'aléa.

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

6 RÉFÉRENCES

Badr S., Gauthier G. & Gondret P. 2016. Crater jet morphology. *Phys. Fluids* 28, 033305.

Bigot D. & Piney S. 2012. Cofiroute - A71 – P15/3 et P11001/05 – River Loire viaduct at Orléans (45) – Bathymetric survey 2011- Technical Report 121880/B.

Boujia N., Schmidt F., Siegert D., Chevalier C. & Pham van Bang D. 2016. Vulnérabilité des ouvrages d'art au risque d'affouillement des fondations. *Journées Techniques 'Ouvrages d'Art'*, Bordeaux, France, Communication.

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.* 134(10), 1424-1447.

Delancet R. 2015. Affouillement autour des ouvrages d'arts : analyse bibliographique et application au pont de l'A10 à Tours. Rapport de stage M2, Univ. F Rabelais, Tours, 61p.

Drew D.A. & Lahey R.T. 1993. Analytical Modelling of Multiphase Flow, in *Particulate Two-Phase Flow*, Ed. M.C. Roco, Butterworth-Heinemann, Boston.

Haghighi 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.* 139(2), 330-339.

ICSE. 2002 à 2016. International Conferences on Scour and Erosion, Proceedings, <http://scour-and-erosion.baw.de/conferences/icsf-1> et suivantes

Jerez Loaiza A. 2011. Etude et suivi de l'érosion des sédiments en contexte immergé. Mémoire de fin d'études, INSA Rennes, 66p.

Larrarte F., Chevalier C., Ndoye O., Durand E., Pham Van Bang D. & de La Roque S. 2016. Scour and solid transport on civil engineering structures – a field study. *THESIS 2016, Two-Phase Modelling For Sediment Dynamics In Geophysical Flows, Tokyo Japan*, 137-140.

Ndoye O., Chevalier C., Reiffsteck P., Minatchy C., Fanelli S. & Pham Van Bang D. 2016. Development of a new submersible test to characterise the erosion of soils and sediments. *Eighth International Conference on Scour and Erosion, Oxford, UK*, 1011-1017.

Nguyen K.D., Guillou S., Chauchat J. & Barbry N. 2009. A two-phase numerical model for suspended sediment transport in estuaries. *Advances in Water Resources* 32, 1187-1196.

Nguyen D.H., Levy F., Pham Van Bang D., Nguyen K.D., Guillou S. & Chauchat J. 2012. Simulation of dredged sediment releases into homogeneous water using a two-phase model. *Advances in Water Resources* 48, 102-112.

Pham Van Bang D., Bai X., Nguyen K.D., Chevalier C. & Ndoye O. 2016. 2-D numerical simulation of Wheel Erosion Test (WET) by a two-phase model. *THESIS 2016, Two-Phase Modelling For Sediment Dynamics In Geophysical Flows, Tokyo Japan*.

Reiffsteck P., Haghighi I. & Chevalier C. 2012. Erodibility diagnostic of existing hydraulic earthworks by Mobile Jets Erosion Test. *Sixth International Conference on Scour and Erosion, Paris, France*, 1105-1112.

Sturm T.W., Ettema R. & Melville B.W. Evaluation of Bridge-Scour Research: Abutment and Contraction Scour Processes and Prediction, NCHRP, Web-Only Document 181, http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_W181.pdf

Taylor O.D.S., Whitlow D. & McKenna M.H. 2012. Remote scour assessment using infrasound. *Sixth International Conference on Scour and Erosion, Paris, France*, 403-410.