



HAL
open science

Projet ANR SSHEAR : développements récents sur la compréhension et la maîtrise des risques d'affouillements

Christophe Chevalier, Frédérique Larrarte, Franziska Schmidt, Damien Pham-Van-Bang, Edouard Durand, Philippe Gondret, Sidoine de La Roque, Mark Cheetham, Mohsen Hosseinghlian

► **To cite this version:**

Christophe Chevalier, Frédérique Larrarte, Franziska Schmidt, Damien Pham-Van-Bang, Edouard Durand, et al.. Projet ANR SSHEAR : développements récents sur la compréhension et la maîtrise des risques d'affouillements. JNGG 2018, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Jun 2018, CHAMPS SUR MARNE, France. 4p. hal-01818505v1

HAL Id: hal-01818505

<https://hal.science/hal-01818505v1>

Submitted on 19 Jun 2018 (v1), last revised 26 Mar 2021 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PROJET ANR SSHEAR : DEVELOPPEMENTS RECENTS SUR LA COMPREHENSION ET LA MAITRISE DES RISQUES D'AFFOUILLEMENTS

RESEARCH PROGRAM SSHEAR: RECENT ADVANCES ON THE UNDERSTANDING AND THE CONTROL OF SCOUR PHENOMENA

Christophe CHEVALIER¹, Frédérique LARRARTE¹, Franziska SCHMIDT¹, Damien PHAM-VAN-BANG², Edouard DURAND², Philippe GONDRET³, Sidoine DE LA ROQUE⁴, Mark CHEETHAM⁵ & Mohsen HOSSEINGHOLIAN⁶

¹ Ifsttar, GERS – MAST, Marne-la-Vallée & Bouguenais, France

² Cerema, Laboratoire St Venant & DTer NC, Chatou & Blois, France

³ Laboratoire FAST, CNRS et Univ. Orsay, France

⁴ Vinci Autoroutes, Cofiroute, Dir. Op. Infrastructure, Saran, France

⁵ SNCF Réseau, Dir. Ingénierie et projets, La Plaine St Denis, France

⁶ IRT Railenium, Famars, France

RÉSUMÉ – Depuis 2015, le projet ANR SSHEAR (« Sols, Structures et Hydraulique : Expertise et Recherche Appliquée ») met en synergie les compétences de 6 partenaires pour avancer sur la compréhension et la maîtrise des risques d'affouillement. Après une présentation du projet, un premier bilan des résultats obtenus est proposé : développements expérimentaux, modélisation numérique, observations de terrain.

ABSTRACT – Since 2015, a consortium comprising six complementary partners has been formed within the project ANR SSHEAR ("Soils, Structures and Hydraulics: Expertise and Applied Research") on the understanding and control of scour phenomena. After a presentation of the project, a first assessment of the achieved results is proposed: experimental developments; numerical modelling; feedback in the field.

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 intermittents ou continus (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 et nécessitant de surcroît 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'études in-situ et de dispositifs à demeure pour évaluer les phénomènes, notamment pendant les crues, évaluer les incertitudes des mesures et caler les modèles.

En France, depuis 40 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. Présentation 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. Les champs disciplinaires couverts incluent la physique des milieux granulaires immergés, le génie civil (mécanique des sols, hydraulique à surface libre) et le calcul scientifique (modèle diphasique) pour répondre aux attentes de gestionnaires d'ouvrages (ferroviaires et routiers).

2.1. Consortium

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 (Laboratoire FAST), gestionnaires d'infrastructures ferroviaires (SNCF Réseau) et routières (Vinci Autoroutes) et institut de recherche technologique (Railenium).

2.2. Description des tâches

Le projet est articulé en quatre tâches.

La tâche 1 - Gestion, coordination et valorisation - a pour objectifs le bon déroulement du projet et la bonne articulation des actions en privilégiant les synergies entre partenaires ainsi que la communication autour du projet et la valorisation des résultats.

La tâche 2 - Approche « Modèle » - comporte 2 volets, expérimental et numérique, visant à améliorer la compréhension des processus d'affouillement, l'instrumentation future des ouvrages réels (tâches 3 et 4) et la modélisation numérique des phénomènes observés en laboratoire et sur le terrain. Le premier volet comporte notamment une étude des échelles impliquées dans le processus (recherche de lois de similitude), des matériaux et de leur sensibilité à l'érosion et comprend des expérimentations sur modèles réduits. Le deuxième volet est celui des travaux de modélisation numérique tridimensionnelle (3D) par une approche diphasique Euler/Euler, pertinente pour tenir compte des différences de vitesses entre sédiments et fluide et des interactions turbulence-fluide-sédiments. Ces travaux comportent notamment une étape de validation par comparaison avec les résultats expérimentaux, des études paramétriques et une généralisation sur les configurations rencontrées sur le terrain.

La tâche 3 - Approche « Terrain » - a pour objectif de développer des outils et une méthodologie aboutissant à une meilleure caractérisation et un meilleur suivi des sites vis-à-vis des processus d'affouillements. A partir d'une étude sur les bases de données des partenaires gestionnaires, plusieurs sites d'étude ont été retenus avec un objectif de représentativité. Des essais de reconnaissance classiques et des techniques complémentaires seront menés pour une meilleure caractérisation des affouillements. Ces travaux s'appuieront sur les résultats de la tâche 2 et alimenteront la tâche 4.

La tâche 4 - Phase « Appropriation » par les gestionnaires et praticiens - a pour point de départ un retour sur expérience et aboutira à des guides pour objectiver et prioriser les pratiques visant à assurer la disponibilité et la régularité des offres de transports. Elle proposera également des outils de diagnostic permettant de maintenir le niveau de sécurité et de pérenniser les niveaux de service.

2.3. Livrables

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 innovante, de type biphasique;
- des guides à destination des praticiens et des gestionnaires,
- des publications scientifiques...

Des illustrations des résultats attendus au cours du projet sont proposées à la suite.

3. Développements expérimentaux et numériques

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.

1.1. WET : dispositif d'essais et résultats expérimentaux

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 *et al.* 2012).

Pour surmonter ces difficultés, il a été conçu un nouveau dispositif, le « Wheel Erosion Test » (WET – essai d'érosion de roue) (Ndoye *et al.* 2016). Il consiste à faire tourner une roue (un cylindre) au dessus d'un lit de sédiments (Fig. 1), 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 par des méthodes acoustiques ou optiques.

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 contrôles sont la distance initiale H_i et la vitesse V_r à la périphérie de la roue (contrôlée par ordinateur de zéro à 1m/s).

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 de la pluviation. Cette méthode est reproductible et évite la présence d'air piégé dans le sédiment.

La Figure 2 illustre un résultat typique d'essais : le développement de la fosse d'érosion pour une distance initiale $H_i = 0,5\text{cm}$ et une vitesse constante $V_r = 0,78\text{m/s}$. Le développement du trou d'affouillement et des dunes est mesuré par méthode acoustique.

Différents essais sont effectués en modifiant les paramètres de contrôle (H_i , V_r), mais aussi les chemins de sollicitation. Dans l'ensemble, les résultats des essais à partir de différents scénarii de sollicitation sont comparables car ils fournissent des résultats finaux similaires à ceux fixés (H_i , V_r).

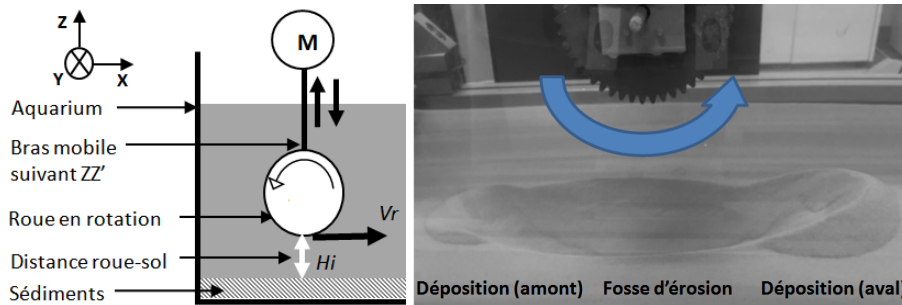


Figure 1. Schéma du dispositif et figure d'érosion (roue soulevée après essai).

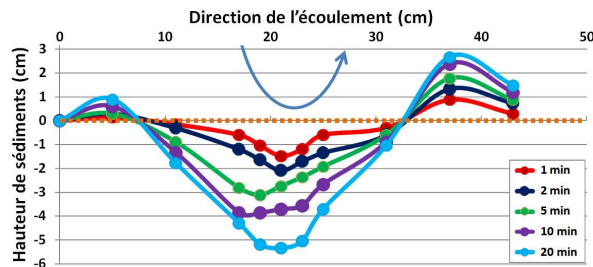


Figure 2. Résultats typiques d'essais ($H_i = 0,5\text{cm}$; $V_r = 0,78\text{m/s}$) en fonction du temps.

3.2. 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 Shields 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.

Des résultats typiques de simulation sont illustrés à la Figure 3. Ils reproduisent qualitativement bien ce qui est observé expérimentalement (Fig. 2) 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).

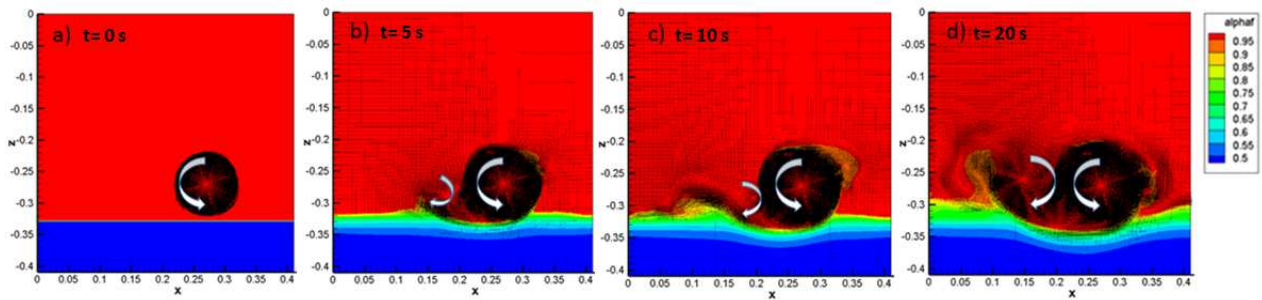


Figure 3. Résultats d'une simulation 2D ($H_i = 1\text{ cm}$; $V_r = 0,78\text{ m/s}$).

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 et ouvrages a d'abord été effectuée par les gestionnaires d'ouvrages du projet, en utilisant des bases de données et des SIG (systèmes d'information géographique). 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 (Fig. 4), représentatif des ouvrages sur piles traversant les fleuves et les cours d'eau principaux dans la partie ouest de la France ;
- le pont sur l'Aurence, à proximité de Limoges (Fig. 5), à voûte unique en maçonnerie très fréquemment utilisée sur le réseau secondaire ferroviaire et représentatif des érosions de culée dues à la contraction de l'écoulement ;
- le remblai-digue le long de l'Allier à St Loup (Fig. 5), situé dans un méandre et représentatif de l'érosion en extrados.



Figure 4. Site 'pilote' du double viaduc de l'A71 sur la Loire à Orléans, France : (à gauche) vue aérienne avec la position des piles, (à droite) vue latérale des piles P3.



Figure 5. Deux sites 'pilotes' : (à gauche) pont ferroviaire sur l'Aurence, (à droite) remblai-digue le long de l'Allier.

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 (Bigot et al. 2012) et 2016 ont montré (Fig. 6) 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, comportement hydraulique de la Loire, géologie, géotechnique...

En 2015, des prélèvements alluvionnaires ont été réalisés. Les analyses granulométriques sont représentées à la Figure 7. 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).

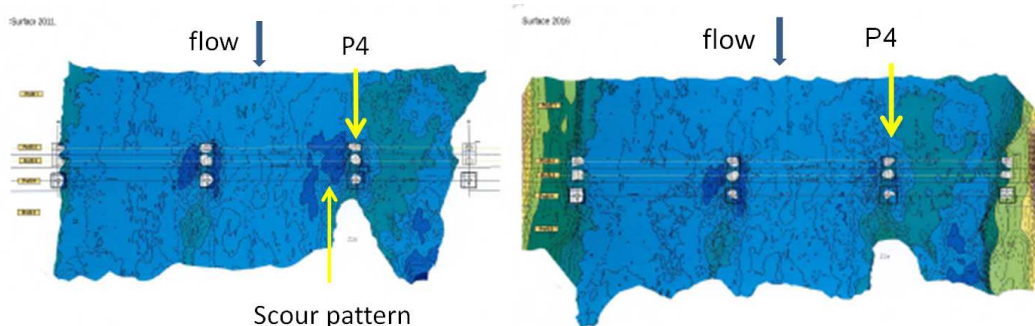


Figure 6. Relevés bathymétriques sur le site de l'A71 sur la Loire à Orléans : (à gauche) en mars 2011, (à droite) en mai 2016.

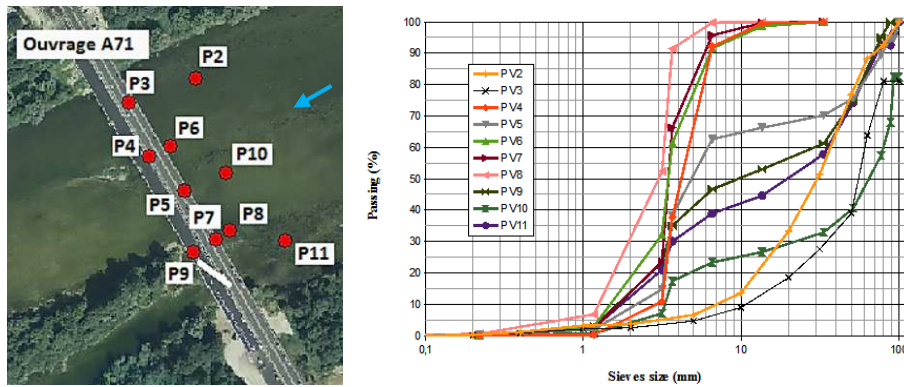


Figure 7. Prélèvements alluvionnaires : points de prélèvement et analyses granulométriques.

4.3. Développements envisagés

De toute évidence, la comparaison entre les deux cartes bathymétriques de la Figure 7 est fortement dépendante des sollicitations hydrauliques survenues entre ces 2 enquêtes : les cycles d'érosion-déposition 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 premiers essais seront réalisés sur le site de l'A71 puis généralisés sur les autres sites. Les avantages / inconvénients de ces dispositifs sont étudiés avec attention.

Une instrumentation à demeure est en cours final de définition. 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

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.

6. Remerciements

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 ».

7. Références bibliographiques

Badr S., Gauthier G., Gondret P. (2016). Crater jet morphology. *Phys. Fluids* 28, 033305.
 Bigot D., Piney S. (2012). Cofiroute - A71 – PI5/3 et PI1001/05 – 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., Ting F., Chen H.C., Cao Y., Han S.W., Kwak K. (2001). Erosion function apparatus for scour rate predictions. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.* 127(2), 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.* 134(10), 1424-1447.
- 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. 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 A., Chevalier C, Larrarte F. (2012). Erosion measurement on immersed situations: a state of the art. Sixth International Conference on Scour and Erosion, Paris, France, 112-119.
- 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. (2011). 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.