



HAL
open science

Érosion et affouillements : vulnérabilité des sols et des ouvrages - Une approche expérimentale multi-échelle des interactions eau(x)-sol(s)-structure(s)

Christophe Chevalier

► To cite this version:

Christophe Chevalier. Érosion et affouillements : vulnérabilité des sols et des ouvrages - Une approche expérimentale multi-échelle des interactions eau(x)-sol(s)-structure(s). Génie civil. Paris Est Sup, 2024. tel-04416069

HAL Id: tel-04416069

<https://univ-eiffel.hal.science/tel-04416069v1>

Submitted on 26 Jan 2024

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.



PARIS-EST SUP
HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Génie civil

présentée par M. Christophe CHEVALIER

Érosion et affouillements :
vulnérabilité des sols et des ouvrages

*Une approche expérimentale multi-échelle
des interactions eau(x)-sol(s)-structure(s)*

Soutenue le 18 janvier 2024 devant le jury composé de :

M.	Iacopo CARNACINA	Senior Lecturer	Examineur
M.	Yujun CUI	Directeur de recherche	Président
Mme	Irini DJERAN-MAIGRE	Professeure	Examinatrice
M.	Didier MAROT	Professeur	Rapporteur
Mme	Farimah MASROURI	Professeure	Rapporteuse
M.	Pierre PHILIPPE	Directeur de recherche	Rapporteur

Table des matières

I	Notice personnelle	5
1	Curriculum Vitae	7
1.1	Etat civil	7
1.2	Coordonnées	7
1.3	Situation actuelle	7
1.4	Etudes et diplômes	7
1.5	Langues	7
1.6	Déroulement de carrière	8
2	Activités scientifiques et techniques	9
2.1	Articles dans des revues internationales avec comité de lecture	9
2.2	Ouvrages scientifiques ou chapitres	11
2.3	Conférence invitée dans un congrès international	11
2.4	Communications avec actes dans un congrès international	11
2.5	Communications avec actes dans un congrès national	16
2.6	Communications à des colloques sans actes	19
2.7	Expertises d'articles ou de projets	21
3	Administration de la recherche	23
3.1	Animation d'équipe	23
3.2	Responsabilités de projets de recherche ou de développement	23
3.3	Participation à des projets de recherche ou de développement	24
3.4	Animation scientifique	24
3.5	Coopérations internationales	24
3.6	Organisation de congrès ou journées techniques	25
3.7	Diffusion de l'information et de la culture scientifique et technique	26
3.8	Recherche de contrats et réponses à appels à projets	27
4	Activités de formation	28
4.1	Enseignements	28
4.2	Encadrement de doctorants et post-doctorants	28
4.3	Encadrement de stagiaires	29
4.4	Participation à des jurys de thèse	31
5	Transfert, application et valorisation des connaissances	32
5.1	Développement et maintenance d'appareillages	32
5.2	Rapports de recherche, d'expertises ou d'essais	32
5.3	Animation et responsabilités dans des réseaux ou commissions scientifiques et techniques	34

II Synthèse des travaux de recherche	35
Introduction générale	37
1 Caractérisation des géomatériaux et des ouvrages en terre vis-à-vis des phénomènes d'érosion	43
1.1 Contexte, enjeux et démarche	43
1.2 Développement d'essais d'érosion	45
1.2.1 Amélioration de l'essai d'érosion de trou - HET	46
1.2.2 Amélioration de l'érodimètre à jets mobiles - MoJET	50
1.2.3 Développement de l'essai d'émiettage automatisé - ACT	53
1.2.4 Rapprochement et comparaison des essais	58
1.3 Résistance à l'érosion et durabilité des matériaux sols-chaux	60
1.3.1 Etude comparative de la résistance à l'érosion des sols traité à la chaux	61
1.3.2 Etude multiphysique de la durabilité des sols traités à la chaux pour une application aux digues maritimes	68
1.4 Conclusion et perspectives de la thématique	77
2 Écoulements complexes dans les milieux poreux et les ouvrages en terre	79
2.1 Contexte, enjeux et démarche	79
2.2 Ecoulement de fluide complexes dans les milieux poreux	80
2.2.1 Caractérisation macroscopique	80
2.2.2 Description microscopique de l'écoulement	82
2.3 Phénomènes de blocage et suffusion dans les sols grossiers	85
2.3.1 Blocage d'un écoulement d'eau dans les sols perméables par injection de coulis	85
2.3.2 Suffusion dans les graves et les sols grossiers	89
2.4 Conclusion et perspectives de la thématique	92
3 Caractérisation et suivi des sites affouillables	93
3.1 Contexte, enjeux et démarche	93
3.2 Caractérisation des interfaces eau-sédiments	95
3.2.1 Développements d'essais pour une meilleure caractérisation des sédiments érodables	95
3.2.2 Suivi en continu des affouillements	99
3.3 Caractérisation des interactions sols-structures en situations modèles	109
3.3.1 Tige instrumentée : vers la mise au point d'un capteur d'affouillement	109
3.3.2 Étude vibratoire des structures affouillables modèles	116
3.4 Suivi et cotation des ouvrages affouillables	120
3.4.1 Suivi vibratoire des ouvrages affouillables	121
3.4.2 Cotation d'ouvrages affouillables par intelligence artificielle	124
3.4.3 Vers une caractérisation de la vulnérabilité sociétale	131
3.5 Conclusion et perspectives de la thématique	134
Conclusion générale et perspectives des travaux de recherche	135
Bibliographie	141

Première partie
Notice personnelle

1 Curriculum Vitae

1.1 Etat civil

Christophe Chevalier
né en 1978,
marié, 3 enfants

1.2 Coordonnées

Adresse : Université Gustave Eiffel / GERS / SRO
Cité Descartes - Bâtiment Bienvenüe
5 Boulevard Descartes - Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée Cedex 2
Téléphone : +33 (0)1 81 66 82 16
+33 (0)6 01 26 50 64
e-mail : christophe.chevalier@univ-eiffel.fr
ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9278-8565>

1.3 Situation actuelle

Ingénieur en Chef des Ponts, Eaux et Forêts en poste à l'Université Gustave Eiffel
Directeur adjoint du Département GERS « Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la Terre »
Chercheur au Laboratoire SRO « Sols, Roches et Ouvrages géotechniques »

1.4 Etudes et diplômes

2003–2006 : Thèse de Doctorat spécialité Physique des Liquides, Université Paris VI (Pierre et Marie Curie), mention Très Honorable avec Félicitations du Jury
2001–2004 : Diplôme d'ingénieur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées
2001–2003 : DEA de Physique Théorique, École Polytechnique, mention Bien
1998–2001 : Diplôme de l'École Polytechnique

1.5 Langues

Anglais : niveau B2
Allemand : niveau A2

1.6 Déroutement de carrière

- 2018–... : Directeur adjoint du Département GERS « Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la Terre » de l'Ifsttar puis de l'université Gustave Eiffel¹
- 2013–2020 : Directeur du Laboratoire SRO « Sols, Roches et Ouvrages géotechniques » du département GERS « Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la Terre » (resp. É. Gaume) de l'Ifsttar²
- 2010–2012 : Chef du groupe GER2 « Comportement des Sols des Roches et des Ouvrages » du département GER « Géotechnique, Eau et Risques » (resp. J.P. Magnan) du LCPC³ puis de l'Ifsttar
- 2007–2010 : Cadre de recherche dans la section CSOG « Comportement des Sols et des Ouvrages Géotechniques » (resp. P. Reiffsteck) de la division MSRGI « Mécanique des Sols et des Roches et Géologie de l'Ingénieur » (resp. P. Mestat) du LCPC
- 2003–2006 : Thèse de Doctorat au Laboratoire PMMH « Physique et Mécanique des Milieux hétérogènes », ESPCI⁴, Paris : « Dynamique et instabilités des interfaces grains / fluide dans les suspensions non-Browniennes »

1. L'université Gustave Eiffel a été fondée le 1er janvier 2020. Née de la fusion de l'Ifsttar et de l'université Paris-Est-Marne-la-Vallée (UPEM). L'Université intègre également quatre écoles : l'ESIEE Paris, l'EIVP, l'ENSG-Géomatique et l'EAV&T Paris-Est.

2. L'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux est l'établissement résultant de la fusion, au 1er janvier 2011, du LCPC et de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS).

3. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

4. École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris.

2 Activités scientifiques et techniques

Depuis janvier 2007 : chercheur à la division MSRGI « Mécanique des Sols et des Roches et de la Géologie de l'Ingénieur » puis au département GERS « Géotechnique, Environnement, Risques Naturels et Sciences de la Terre »

Domaines d'activités : les interactions eau-sol-structure avec, en particulier, des recherches expérimentales en laboratoire et sur le terrain sur les risques érosifs touchant les ouvrages en terre ou les ouvrages d'art en site aquatique

2.1 Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

24 papiers publiés, 439 citations hors auto-citation (369 papiers), h-index : 9

- [ACL1] Wang, T., Reiffsteck, P., Chevalier, C., Chen, C.W. & Schmidt, F. (2023) An interpretable model for bridge scour risk assessment using explainable artificial intelligence and engineers' expertise. *Structure and Infrastructure Engineering*, <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2230564>
- [ACL2] Wang, T., Reiffsteck, P., Chevalier, C., Zhu, Z., Chen, C.W. & Schmidt, F. (2023) A novel extreme gradient boosting algorithm based model for predicting the scour risk around bridge piers : application to French railway bridges. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(3), 1104-1122, <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2072957>
- [ACL3] Ientile, I., Bianne, G., Chevalier, C., Schmidt, F., Rasol, M., Orcesi, A., Adelaide, L. & Nedjar, B. (2022) Measuring road network resilience by loss of serviceability index for critical road links. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, <https://doi.org/10.1680/jbren.21.00098>
- [ACL4] Chevalier, C. & Larrarte, F. (2022) Real time instability of flow close to a scour affected abutment. *Environmental Fluid Mechanics*, 22, 495-510, <https://doi.org/10.1007/s10652-022-09842-9>
- [ACL5] Haghghi, I., Martin, T., Reiffsteck, P., Duc, M., Szymkiewicz, F. & Chevalier, C. (2022) An automated crumb test procedure to estimate the soil disaggregation properties in contact with water. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(10), 4416-4431, <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1854123>
- [ACL6] Belmokhtar, M., Schmidt, F., Ture Savadkoohi, A. & Chevalier, C. (2021) Scour monitoring of a bridge pier through eigenfrequencies analysis. *SN Applied Sciences*, 3, 303, <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04282-4>
- [ACL7] Rasol, M., Schmidt, F., Ientile, I., Adelaide, L., Nedjar, B., Kane, M. & Chevalier, C. (2021) Progress and Monitoring Opportunities of Skid Resistance in Road Transport : A Critical Review and Road Sensors. *Remote Sensing*, 13, 3729, <https://doi.org/10.3390/rs13183729>

- [ACL8] Larrarte, F., Chevalier, C., Battist, L. & Chollet, H. (2020) Hydraulics and bridges : A French case study of monitoring of a bridge affected by scour. *Flow Measurement and Instrumentation*, 74, 101783, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101783>
- [ACL9] Boujia, N., Schmidt, F., Chevalier, C., Siegert, D. & Pham Van Bang, D. (2020) Using Rocking Frequencies of Bridge Piers for Scour Monitoring. *Structural Engineering International*, 31, 286-294, <https://doi.org/10.1080/10168664.2020.1768811>
- [ACL10] Boujia, N., Schmidt, F., Chevalier, C., Siegert, D. & Pham Van Bang, D. (2020) Distributed Optical Fiber-Based Approach for Soil-Structure Interaction. *Sensors*, 20(1), 321, <https://doi.org/10.3390/s20010321>
- [ACL11] Boujia, N., Schmidt, F., Chevalier, C., Siegert, D. & Pham Van Bang, D. (2019) Effect of scour on the natural frequency responses of bridge piers : development of a scour depth sensor. *Infrastructures*, 4(2) , 21, <https://doi.org/10.3390/infrastructures4020021>
- [ACL12] Florens, E., Chevalier, C., Larrarte, F., Schmidt, F. & Durand, E. (2018) Scour monitoring on bridge pier - methodology and implementation. *E3S Web of Conferences, River Flow 2018*, 40, 03020, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003020>
- [ACL13] Boujia, N., Schmidt, F., Siegert, D., Pham Van Bang, D. & Chevalier, C. (2017) Modelling of a bridge pier subjected to scour. *Procedia Engineering*, 199, 2925-2930, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.343>
- [ACL14] Chevalier, T., Rodts, S., Chevalier, C. & Coussot, P. (2015) Quantitative exploitation of PFG NMR and MRI velocimetry data for the rheological study of yield stress fluid flows at macro- and micro-scales in complex geometries. *Experiments in Fluids* 56(1), 1-16, <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1868-4>
- [ACL15] Chevalier, T., Faure, P.F., Chevalier, C., Coussot, P. & Rodts, S. (2014) Velocity distributions in confined flows of some complex fluids : Sequence, sample and hardware issues. *Journal of Magnetic Resonance* 245, 156-170, <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2014.05.005>
- [ACL16] Chevalier, T., Rodts, S., Chateau, X., Chevalier, C. & Coussot, P. (2014) Breaking of non-Newtonian character in flows through a porous medium. *Physical Review E* 89(2), 023002, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.023002>
- [ACL17] Herrier, G., Puiatti, D., Chevalier, C., Froumentin, M., Bonelli, S. & Fry, J.J. (2013) Lime Treatment : New Perspectives for the use of Silty and Clayey Soils in Earthen Hydraulic Structures. *Wasserwirtschaft* 103(5), 112-115, <https://doi.org/10.1365/s35147-013-0546-4>
- [ACL18] Haghghi, I., Chevalier, C., Duc, M., Guédon, S. & Reiffsteck, P. (2013) Improvement of Hole Erosion Test and Results on Reference Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139(2), 330-339, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000747](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000747)
- [ACL19] Chevalier, T., Chevalier, C., Clain, X., Dupla, J.C., Canou, J., Rodts, S. & Coussot, P. (2013) Darcy's law for yield stress fluid flowing through a porous medium. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 195, 57-66, <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2012.12.005>

- [ACL20] Chevalier, C., Lindner, A., Leroux, M. & Clément, E. (2009) Morphodynamics during injection of air into a confined granular suspension. *Journal of Non Newtonian Fluid Mechanics* 158, 63-72, <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.07.007>
- [ACL21] Johnsen, Ø., Chevalier, C., Lindner, A., Toussaint, R., Clément, E., Maløy, K.J., Flekkøy, E.G. & Schmittbuhl J. (2008) Decompaction and fluidization of a saturated and confined granular medium by injection of a viscous liquid or gas. *Physical Review E* 78, 051302, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.051302>
- [ACL22] Chevalier, C., Lindner, A. & Clément, E. (2007) Destabilization of a Saffman-Taylor fingerlike pattern in a granular suspension, *Physical Review Letters* 99, 174501, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.174501>
- [ACL23] Chevalier, C., Ben Amar, M., Bonn, D. & Lindner, A. (2006) Inertial effects on Saffman-Taylor viscous fingering, *Journal of Fluid Mechanics*, 552, 83-97, <https://doi.org/10.1017/S0022112005008529>
- [ACL24] Chevalier, C. & Meunier, F. (2005) Environmental assessment of biogas co- or tri-generation units by life cycle analysis methodology, *Applied Thermal Engineering*, 25, 3025-3041, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.03.011>

2.2 Ouvrages scientifiques ou chapitres

- [OS1] CFBR (ouvrage collectif) (2021) Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai, *Chapitre 4 Filtration et Drainage (coordination)*, ISBN : 979-10-96371-17-4, https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recueil_confortement_digues_partie_1.pdf
- [OS2] Chevalier, C. & Bonelli, S. (éditeurs) (2017) Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques, *Méthodologie de caractérisation au laboratoire*, Presse des Ponts et Chaussées, 234 p., ISBN : 978-2-85978-500-0
- [OS3] Benahmed, N., Bonelli, S. & Chevalier, C. (2012) Erosion des géomatériaux, traité MIM, risques naturels, *Chapitre 5 Erosion par écoulement localisé dans un conduit*, ed Hermès, ISBN : 978-2-7462-2570-1
- [OS4] Benahmed, N., Bonelli, S. & Chevalier, C. (2012) Erosion of geomaterials, *Chapter 5 Concentrated Leak Erosion*, ISTE, Wiley, ISBN : 978-1-8482-1351-7

2.3 Conférence invitée dans un congrès international

- [INV1] Chevalier, C., Pham-Van-Bang, D. & Durand, E. (2014) Scour and erosion phenomena occurring in waterways - recent advances, Keynote lecturer at the 7th International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Dec. 2-4, Perth, Australia.

2.4 Communications avec actes dans un congrès international

- [ACTI1] Chevalier, C., Larrarte, F., Chollet, H., Schmidt, F., Belmokhtar, M., Battist, L., Wintenberger, C. & Jacques, J.P. (2023) Scour monitoring on bridge pier :

- two French returns on experience. Eleventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Sep. 17-21, Copenhagen, Denmark
- [ACTI2] Larrarte, F., Chevalier, C., Minatchy, C. & Chollet, H. (2023) PUMP Erosion Test : an erodimeter for field studies. Eleventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Sep. 17-21, Copenhagen, Denmark
- [ACTI3] Watanabe, K., Nakagawa, F., Sanagawa, T. & Chevalier, C. (2023) Hydraulic model test on destabilization process of river bridge pier caused by local scours. Eleventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Sep. 17-21, Copenhagen, Denmark
- [ACTI4] Wang, T., Takayanagi, T., Chen, C.W., Reiffsteck, P., Chevalier, C. & Schmidt F. (2023) A comparison of the French and Japanese scour risk assessment procedures for railway infrastructure. Eleventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Sep. 17-21, Copenhagen, Denmark
- [ACTI5] Larrarte, F. & Chevalier, C. (2023) Pump Erosion Test : a low cost erodimeter for field studies. 40th IAHR World congress, Aug. 21-25, Vienna, Austria
- [ACTI6] Tourment, R., Saussaye, L., Boussafir, Y., Chevalier, C., Deniaud, Y. & Patouillard, S. (2023) Principles, methods and techniques for reinforcing and repairing flood protection levees. 91st Annual ICOLD Meeting, Symposium "Management for Safe Dams", June 13-14, Gothenburg, Sweden
- [ACTI7] Wang, T., Reiffsteck, P., Chevalier, C., Chen, C.W. & Schmidt, F. (2022) Machine learning (ML) based predictive maintenance policy for bridges crossing waterways. Elsevier Transportation Research Procedia, Transport Research Arena (TRA) Conference, Nov. 14-17, Lisbon, Spain
- [ACTI8] Belmokhtar, M., Bonnot, A., Schmidt, F., Chevalier, C. & Ture Savadkoohi, A. (2022) Revisited Frequency Domain Decomposition for vibration monitoring of a bridge subjected to scour. ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering, Sept. 12-14, Leuven, Belgium
- [ACTI9] Belmokhtar, M., Schmidt, F., Chevalier, C. & Ture Savadkoohi, A. (2022) Features detection using vibration analysis : Monitoring of a French Bridge. 3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure (ICONHIC2022), July 5-7, Athens, Greece
- [ACTI10] Ientile, S., Rasol, M., Schmidt, F., Adelaide, L., Nedjar, B., Chevalier, C. & Sevilla de la Llave, I. (2022) Sensor-based monitoring systems for resilient road infrastructures. 3rd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure (ICONHIC2022), July 5-7, Athens, Greece
- [ACTI11] Larrarte, F., Chevalier, C., Cholet, H., Schmidt, F., Belmokhtar, M. & Wintemberger, C. (2022) Monitoring of Real Sites affected by Scour : Observation, Analysis and Feedback of Field Data. 39th IAHR World congress, June 19-24, Granada, Spain
- [ACTI12] Wang, T., Reiffsteck, P., Chevalier, C., Chen, C.W. & Schmidt, F. (2021) Application of Random Forest algorithm in bridge scour risk prediction. Machine Learning & Risk Assessment (MLRA2021), Oct. 25-28, Wroclaw, Poland, 2 pages

- [ACTI13] De Baecque, M., Chevalier, C., Palma Lopes, S. & Reiffsteck, P. (2021) Influence of sea water and wetting-drying cycles on the erosion of a lime treated soil : perspectives to marine dike improvement. Tenth International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Oct. 18-21, Online, 8 pages
- [ACTI14] Chevalier, C., Larrarte, F., Schmidt, F., Cholet, H., Durand, E., Pham-Van-Bang, D., Bontemps, A., Sergent, P., Gondret, P., Morize, C., de la Roque, S. & Cheetham, M. (2021) A review of Soils, Structures and Hydraulics : Expertise and Applied Research (SSHEAR) project. Tenth International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Oct. 18-21, Online, 8 pages
- [ACTI15] Belmokhtar, M., Schmidt, F., Chevalier, C. & Ture Savadkoochi, A. (2021) Vibration-based method for structural health monitoring of a bridge pier subjected to environmental loads. 9th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES2021), Sept. 14-17, Online, 6 pages
- [ACTI16] Ientile, S., Schmidt, F., Chevalier, C., Orcesi, A., Adelaide, L. & Nedjar, B. (2020) A road network analysis for risk and resilience assessment framework of road infrastructure system. 12th International Conference on Risk Analysis and Hazard Mitigation, Risk Analysis 2020, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol 129, 197-206
- [ACTI17] Larrarte, F., Chollet, H., Battist, L., Della Longa, Y. & Chevalier, C. (2019) A French Experience of Continuous Scour Monitoring on a Real Site. 38th IAHR World congress, Sept. 1-6, Panama, 7 pages
- [ACTI18] Larrarte, F., Schmidt, F., Boujia, N., Vidal, V., Bontemps, A., de la Roque, S. & Chevalier, C. (2019) Some Elements About Scale Effect on Scour Studies. 38th IAHR World congress, 1-6 september, Panama, 7 pages
- [ACTI19] Larrarte, F., Schmidt, F., Durand, E., Bontemps, A., Della Longa, Y., de la Roque, S., Hosseingholian, M. & Chevalier, C. (2019) A French experience of Structural Health Monitoring of scour affecting river infrastructures. Smart Rivers 2019, Sept. 30 - Oct. 3, Lyon, France, 3 pages
- [ACTI20] Cheetham, M., Chevalier, C., Larrarte, F., Schmidt, F., Durand, E., Sergent, P., Gondret, P. & de la Roque, S. (2019) Soils, Structures and Hydraulics : Expertise and Applied Research (SSHEAR) Project. 12th World Congress on Railway Research (WCRR), Oct. 28 - Nov. 1, Tokyo, Japan, 6 pages
- [ACTI21] Takayanagi, T., Durand, E., Davi, D., Chevalier, C., Cheetham, M., Naito, N., Sanagawa, T. & Watanabe, K. (2019) Scour risk management at bridges - A comparison of Japanese and French scoring methodologies. 12th World Congress on Railway Research (WCRR), Oct. 28 - Nov. 1, Tokyo, Japan, 6 pages
- [ACTI22] Florens E., Chevalier C., Larrarte F., Schmidt F. & Durand E. (2018) Scour monitoring on bridge pier-methodology and implementations. Ninth International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Nov. 5-8, Taipei, Taiwan, 461-468
- [ACTI23] De Baecque, M., Chevalier, C., Le Feuvre, M., Palma Lopes, S. & Reiffsteck, P. (2018) Durability of lime treated soil in coastal environment : Methodology for a laboratory study and first results. Ninth International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Nov. 5-8, Taipei, Taiwan, 499-504

- [ACTI24] Chevalier, C., Larrarte, F., Schmidt, F., Pham-Van-Bang, D., Durand, E., Gondret, P., de la Roque, S., Cheetham, M. & Hosseingholian, M. (2018) Research program SSHEAR : recent advances on the understanding and the control of scour phenomena. Ninth International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Nov. 5-8, Taipei, Taiwan, 737-743
- [ACTI25] Florens E., Chevalier C., Larrarte F., Schmidt F. & Durand E. (2018) Scour monitoring on bridge pier - methodology and implementation. River Flow 2018, Sept. 5-8, Lyon, France, E3S Web of Conferences 40, 03020, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003020>
- [ACTI26] Boujia, N., Schmidt, F., Chevalier, C., Siegert, D. & Pham van Bang, D. (2018) Bridge scour monitoring technique using the vibratory response of rods embedded in the riverbed, 7th Transport Research Arena TRA 2018, Apr. 16-19, Vienna, Austria, 10 pages
- [ACTI27] Chevalier, C., Larrarte, F., Schmidt, F., Pham-Van-Bang, D., Durand, E., Gondret, P., de la Roque, S., Cheetham, M. & Hosseingholian, M. (2017) Understanding and control of scour phenomena : recent advances. GEORAIL International symposium, Nov. 23-24, Champs-sur-Marne, France, 331-339
- [ACTI28] Chevalier, C., Larrarte, F., Schmidt, F., Pham-Van-Bang, D., Durand, E., Gondret, P., de la Roque, S., Cheetham, M. & Hosseingholian, M. (2017) Understanding and control of scour phenomena : recent advances. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), Sept. 17-22, Seoul, Korea
- [ACTI29] Boujia, N., Schmidt, F., Siegert, D., Pham Van Bang, D. & Chevalier, C. (2017) Modelling of a bridge pier subjected to scour. X International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2017), Sept. 10-13, Roma, Italy
- [ACTI30] De Baecque, M., Chevalier, C., Palma Lopes, S., Le Feuvre, M. & Reiffsteck, P. (2017) Resistance to erosion of lime treated soils for application to coastal dikes. 25th Meeting of the European Working Group on internal erosion in embankment dams & their foundations, Sept. 4-7, Delft, The Netherlands
- [ACTI31] Lachaussée, F., Pham Van Bang, D., Vidal, V., Chevalier, C., Ndoye, O., Szymkiewicz, F., Minatchy, C., Martineau, F. & Watanabe, K. (2016) Overflow erosion on mixed kaolin-sand embankments. Eighth International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Sept. 12-15, Oxford, UK, 653-658
- [ACTI32] Le Kouby, A., Chevalier, C. & Saussaye, L. (2016) Dikes reinforced by deep mixing techniques - long term properties. Eighth International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Sept. 12-15, Oxford, UK, 659-663
- [ACTI33] 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 (ICSE), Sept. 12-15, Oxford, UK, 1011-1017
- [ACTI34] 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, Sept. 12-14, Tokyo, Japan, 137-140

- [ACTI35] 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, Sept. 12-14, Tokyo, Japan, 4pages
- [ACTI36] Charles, I., Herrier, G., Chevalier, C. & Durand, E. (2015) A real scale experimental dike in lime-treated soil. Proceedings of the 16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI ECSMGE), Sept. 13-17, Edinburgh, UK, 1989-1994
- [ACTI37] Chevalier, C., Herrier, G. & Charles, I. (2015) Resistance to erosion of lime treated soils. Proceedings of the 16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI ECSMGE), Sept. 13-17, Edinburgh, UK, 2773-2779
- [ACTI38] Fry, J.J., Francois, D., Marot, D., Bonelli, S., Royet, P., Chevalier, C. & Deroo, L. (2015) Study of internal erosion : contribution from Erinoh Project. ICOLD 25th Congress, June 13-20, Stavanger, Norway, 486-507
- [ACTI39] Chevalier, C., Pham Van Bang, D., Durand, E., Charles, I. & Herrier, G. (2014) Scour and erosion phenomena occurring in waterways - recent advances (Key-note lecture). Seventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE7), Dec. 2-4, Perth, Australia, 33-48
- [ACTI40] Charles, I., Herrier, G., Chevalier, C., Durand, E., Puiatti, D., Fleureau, J.M., Taibi, S., Bonelli, S. & Fry, J.J. (2014) A real scale experimental dike in lime-treated soil : Evaluation of the methodology, mechanical and hydraulic performance. Seventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE7), Dec. 2-4, Perth, Australia, 521-527
- [ACTI41] Herrier, G., Puiatti, D., Bonelli, S., Fry, J.J., Chevalier, C. & Froumentin, M. (2014) Lime treated soils properties for application in railways infrastructure with hydraulic constraints. GEORAIL 2014 International Symposium, Nov. 6-7, Marne-la-Vallée, France
- [ACTI42] Charles, I., Herrier, G., Chevalier, C. & Durand, E. (2012) An experimental full-scale hydraulic earthen structure in lime treated soil. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France, 181-188
- [ACTI43] Chevalier, C., Haghghi, I. & Herrier, G. (2012) Resistance to erosion of lime treated soils : a complete parametric study in laboratory. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France, 161-168
- [ACTI44] Haghghi, I., Chevalier, C. & Reiffsteck, P. (2012) An Enhanced Crumb Test for a better characterization of water effects on soils. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France, 159-166
- [ACTI45] Herrier, G., Chevalier, C., Froumentin, M., Cuisinier, O., Bonelli, S. and Fry, J.J. (2012) Lime treated soils as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France, 97-104
- [ACTI46] Jerez, A., Chevalier, C. & Larrarte, F. (2012) Erosion measurement on immersed situations : a state of the art. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France, 112-119

- [ACTI47] Reiffsteck, P., Haghghi, I. & Chevalier, C. (2012) Erodibility diagnostic of existing hydraulic earthworks by Mobile Jets Erosion Test - In-situ database. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France, 166-173
- [ACTI48] Truong, Q.Q., Canou, J., Dupla, J.C., Chevalier, C. & Chopin, M. (2012) Water flow blocking process in permeable soils by injection of specific grouts. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France, 224-231
- [ACTI49] Herrier, G., Lesueur, D., Puiatti, D., Auriol, J.C., Cuisinier, O., Chevalier, C., Haghghi, I. & Bonelli, S. (2012) Principles and properties of soils treated by lime for hydraulic earthen structures, 3rd International Seminar on Earthworks in Europe, Berlin, Germany, 12 pages
- [ACTI50] Chevalier, C., Haghghi, I., Martin, T. & Reiffsteck, P. (2011) An "Enhanced Crumb Test" for better characterizing water effects on soils. 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens, Greece, 4 pages
- [ACTI51] Chevalier, C., Haghghi, I., Pham, T.L. & Reiffsteck, P. (2010) Two complementary tests for characterizing the soil erosion, Proceedings of the fifth International Conference on Scour and Erosion. ASCE, Geotechnical Special Publication No. 210, 152-161
- [ACTI52] Pham, T.L., Duc, M., Chevalier, C., Reiffsteck, P. & Guédon, S. (2009) Erosion of soils : two complementary approaches. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Egypt, 4 pages
- [ACTI53] Chevalier, C., Duc, M., Guédon, S., Pham, T.L. and Reiffsteck, P. (2008) Hole Erosion Test and Mobile Jets Erosion Test, two complementary approaches, Workshop "Internal Erosion", Weimar, Germany, 3-12
- [ACTI54] Pham, T.L., Chevalier, C., Duc, M., Reiffsteck, P. & Guédon, S. (2008) Development of a new test to characterize dispersion of soil. Fourth International Conference on Scour and Erosion, Nov., Tokyo, Japan, 6 pages
- [ACTI55] Chevalier, C., Lindner, A. & Clément, E. (2005) Pattern formation by injection of air in a non-Brownian suspension. Powders and Grains, 18-22 July, Stuttgart, Germany, 1061-1066

2.5 Communications avec actes dans un congrès national

- [ACTN1] Larrarte, F., Chevalier, C., Minatchy, C. & Chollet, H. (2022) Pump Erosion Test : un érodimètre low cost de terrain. Actes des 18èmes Journées de l'Hydrodynamique, 22-24 novembre, Poitiers, France, 8 pages
- [ACTN2] Wang, T., Reiffsteck, P., Chevalier, C., Chen, C.W. & Schmidt, F. (2022) Maintenance prédictive des ouvrages d'art avec des fondations en sites aquatiques. Actes des 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 28-30 juin, Lyon, France, 8 pages

- [ACTN3] Hemmati, S., De Baecque, M. & Chevalier, C. (2022) Modélisation numérique des cycles hydriques sur un échantillon d'un sol traité à la chaux. Actes des 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 28-30 juin, Lyon, Lyon, France, 8 pages
- [ACTN4] Belmokhtar, M., Schmidt, F., Ture Savadkoochi, A. & Chevalier, C. (2022) Piles de ponts soumis aux affouillements : Vibrations rigides des structures en interaction avec des sols élastiques. 15ème Colloque National en Calcul des Structures (CSMA), 16-20 mai, Giens, France, 5 pages
- [ACTN5] Saussaye, L., Das, G., Razakamanantsoa, A., Rayssac, E., Deneele, D., Chevalier, C., Battist, L., Herrier, G., Lesueur, D. Poncelet, N., Jacqueline, D., Froumentin, M., Maisonnace, C., Durand, E. & Ranaivomanana, H. (2020) Digue expérimentale du CER de Rouen en sol limoneux traité à la chaux et non traité : évaluation après 7 ans. Actes des 10èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 2-3 novembre, en ligne, 8 pages
- [ACTN6] Dore, L., Boussafir, Y. & Chevalier, C. (2020) Développement d'une méthode d'essai d'émiettement amélioré par traitement d'images. Actes des 10èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 2-3 novembre, en ligne, 8 pages
- [ACTN7] Faisant, T., Peyras, L., Jeannot, C., Tekatlian, A., Gendrey, S., Chevalier, C., De Baecque, M., Schleyer-Lindenmann, A., Bertoldo, R., De Paris, C. & Mallet, T. (2019) Projet de R&D DIGUE 2020 : réalisation d'une plateforme de recherche en site maritime pour l'étude des actions de la mer sur les digues, la durabilité, et la perception du risque de submersion. 3ème colloque national « Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions », 20-21 mars, Aix-en-Provence, France, 9 pages, DOI : 10.5281/zenodo.2347998
- [ACTN8] De Baecque, M., Chevalier, C., Le Feuvre, M., Palma Lopes, S. & Reiffsteck, P. (2019) Durabilité d'un sol traité à la chaux en environnement maritime : méthodologie de l'étude et premiers résultats. 3ème colloque national « Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions », 20-21 mars, Aix-en-Provence, France, 8 pages, DOI : 10.5281/zenodo.2530082
- [ACTN9] Poulain, D., Sutter, M., Tourment, R., Maurin, J., Auger, N., Chevalier, C., Deniaud, Y., Ledoux, P., Mallet, T., Palacios, J.C. & Pinhas, M. (2019) Guide technique CFBR - Méthodes et techniques de confortement des digues. 3ème colloque national « Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions », 20-21 mars, Aix-en-Provence, France, 7 pages, DOI : 10.5281/zenodo.2535489
- [ACTN10] Chevalier, C., Larrarte, F., Schmidt, F., Pham-Van-Bang, D., Durand, E., Gondret, P., de la Roque, S., Cheetham, M. & Hosseingholian, M. (2018) Projet ANR SSHEAR : développements récents sur la compréhension, et la maîtrise des risques d'affouillements. Actes des 9èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 13-15 juin. Marne-la-Vallée : IFSTTAR-ENPC, 2018. Collection Actes Interactifs de l'Ifsttar, AII3. 978-2-85782-742-9, <http://www.ifsttar.fr/collections>, 8 pages
- [ACTN11] De Baecque, M., Chevalier, C., Le Feuvre, M., Palma Lopes, S. & Reiffsteck, P. (2018) Durabilité d'un sol traité à la chaux en environnement maritime :

- méthodologie de l'étude. Actes des 9èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 13-15 juin. Marne-la-Vallée : IFSTTAR-ENPC, 2018. Collection Actes Interactifs de l'Ifsttar, AII3. 978-2-85782-742-9, <http://www.ifsttar.fr/collections>, 8 pages
- [ACTN12] Ndoye, O., Chevalier, C., Reiffsteck, P., Fanelli, S., Minatchy, C. & Pham Van Bang, D. (2016) Développement d'un nouvel essai de caractérisation de l'érodabilité des sols. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 6-8 juin, Nancy, France, 410-417
- [ACTN13] Le Kouby, A., Saussaye, L., Fargier, Y., Boussafir, Y., Durand, E., Chevalier, C., Ananfouet, Y., Patouillard, S., Manceau, N., Gervais, L. & Auger, N. (2016). Renforcement des digues de Loire par la technique du Deep soil mixing ; deux méthodes proposées - suivi sur deux ans. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 6-8 juin, Nancy, France, 229-236
- [ACTN14] Chevalier, T., Chevalier, C., Clain, X., Dupla, J.C., Canou, J., Rodts, S. & Coussot, P. (2013) Loi de Darcy pour les fluides à seuil en milieu poreux. 31èmes rencontres universitaires de l'AUGC, 29-31 mai, Cachan, France, 10p
- [ACTN15] Chevalier, C., Haghghi, I. & Herrier, G. (2013) Résistance à l'érosion des sols traités à la chaux et application aux digues : une étude paramétrique complète en laboratoire. 2ème colloque national « Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions », 12-14 juin, Aix-en-Provence, France, 558-564
- [ACTN16] Charles, I., Herrier, G., Chevalier, C. & Durand, E. (2013) La digue expérimentale du CER de Rouen : un ouvrage hydraulique en vraie grandeur en sol traité à la chaux. 2ème colloque national « Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions », 12-14 juin, Aix-en-Provence, France, 565-571
- [ACTN17] Herrier, G., Chevalier, C., Froumentin, M., Bonelli, S. & Fry, J.J. (2013) Le sol traité à la chaux : un matériau résistant à l'érosion pour les ouvrages hydrauliques. 2ème colloque national « Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions », 12-14 juin, Aix-en-Provence, France, 572-579
- [ACTN18] Chevalier, T., Chevalier, C., & Coussot, P. (2011) Loi d'injection de fluides à seuil en milieu poreux. 46ème colloque du Groupe Français de Rhéologie, Nancy, France, 4 pages
- [ACTN19] Haghghi, I., Martin, T., Chevalier, C. & Reiffsteck, P. (2010) Un essai simple et rapide pour étudier l'influence de l'eau sur la microstructure des sols. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Grenoble, France, 255-262
- [ACTN20] Clain, X., Chevalier, C., Canou, J., Dupla, J.C. & Coussot, P. (2009) Injection de fluides d'Herschel-Bulkley en milieu poreux. 44ème colloque du Groupe Français de Rhéologie, Strasbourg, France, 5 pages
- [ACTN21] Clain, X., Coussot, P., Chevalier, C., Canou, J. & Dupla, J.C. (2008) Injection de fluides non-Newtoniens en milieu poreux. 43ème colloque du Groupe Français de Rhéologie, Palaiseau, France, 4 pages

- [ACTN22] Pham, T.L., Duc, M., Chevalier, C., Reiffsteck, P. & Guédon, S. (2008) Développement d'un nouvel essai caractérisant la dispersion des sols. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nantes, France, 603-610
- [ACTN23] Pham, T.L., Maloula, A., Duc, M., Reiffsteck, P., Chevalier, C. & Guédon, S. (2007) Dispersion par un fluide de la fraction fine argileuse contenue dans les milieux poreux que sont les sols. 32èmes journées du GFHN, Nantes, France, 6 pages
- [ACTN24] Chevalier, C., Ben Amar, M., Bonn, D. & Lindner, A. (2005) Etude des effets d'inertie dans l'instabilité de Saffman-Taylor. 8e Rencontre du Non-Linéaire, 9-11 mars, Paris, France, 49-54

2.6 Communications à des colloques sans actes

- [COM1] Belmokhtar, M., Ture Savadkoochi, A., Chevalier, C. & Schmidt, F. (2023) Operational modal analysis for scour monitoring of bridge piers. SURVISHNO, Surveillance Vibrations Shocks Noise Conference, Jul. 10-13, Toulouse, France
- [COM2] Larrarte, F. & Chevalier, C. (2023) Monitoring de l'affouillement près de ponts. Colloque SHF Apports des nouvelles technologies à l'étude du transport sédimentaire et de la morphodynamique, 01-02 juin, Grenoble, France
- [COM3] Larrarte, F. & Chevalier, C. (2023) Un nouvel érodimètre de terrain : le Pumpet. Colloque SHF Apports des nouvelles technologies à l'étude du transport sédimentaire et de la morphodynamique, 01-02 juin, Grenoble, France
- [COM4] Chevalier, C., Pham Van Bang, D. & Ndoye, O. (2019) Caractérisation de l'érodabilité des sédiments : instrumentation et validation de l'essai d'érosion de roue. Rencontre de la SHF, 20-22 nov., Marne-la-Vallée, France
- [COM5] Schmidt, F., Davi, D., Chevalier, C., Durand, E. & Larrarte, F. (2019) Instrumentation d'un viaduc de l'A71 pour le suivi des affouillements. Journées Ouvrages d'Art, 14-16 mai, Lille, France
- [COM6] De Baecque, M., Chevalier, C., Palma Lopes, S., Le Feuvre, M. & Reiffsteck, P. (2017) Caractérisations multi-physiques et étude de la durabilité d'un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes : méthodologie. Journées « Géotechnique » Cerema-Ifsttar, 14-16 nov., Blériot-plage, France
- [COM7] Chevalier, C. & Durand, E. (2017) Géotechnique et ouvrages hydrauliques : présentation des projets SSHEAR et Digue2020. Journée « Eau » Cerema-Ifsttar, 15 nov., Champs-sur-Marne, France
- [COM8] Chevalier, C. (2016) Scour and erosion phenomena occurring in waterways. RTRI-Ifsttar technical meeting, June 20-23, Marne-la-Vallée, France.
- [COM9] Ndoye, O. & Chevalier, C. (2015) Essai de caractérisation pour les affouillements des ouvrages hydrauliques, le Wheel Erosion Test (WET). Journées « Géotechnique » Cerema-Ifsttar, 13-15 oct., Lacanau, France
- [COM10] Chevalier, C., Durand, E. & Pham Van Bang D. (2014) Contenu de l'opération de recherche Doféas. Journées Techniques « Gestion des Risques Hydrologiques et des Ouvrages Fluviaux », 18-19 nov., Aix-en-Provence, France

- [COM11] Chevalier, C. & Herrier, G. (2014) Résistance à l'érosion des sols traités à la chaux : comportement en laboratoire. Journées Techniques « Gestion des Risques Hydrologiques et des Ouvrages Fluviaux », 18-19 nov., Aix-en-Provence, France
- [COM12] Chevalier, C. (2014) Projet ANR « SSHEAR » - affouillement des ouvrages fluviaux. Journées Techniques « Gestion des Risques Hydrologiques et des Ouvrages Fluviaux », 18-19 nov., Aix-en-Provence, France
- [COM13] Chevalier, C. (2014) Présentation du projet SSHEAR « Sols, Structures et Hydraulique : Expertise et Recherche Appliquée ». Journées « Géotechnique » Cerema-Ifsttar, 14-16 oct., Dourdan, France
- [COM14] Chevalier T., Rodts S., Chevalier C., Château X. & Coussot P. (2014) The specificity of yield stress fluid flows through porous media. 9th Annual European Rheology Conference, March, Karlsruhe, Allemagne
- [COM15] Chevalier, C. (2013) Résistance à l'érosion des sols traités à la chaux et application aux digues, une étude paramétrique complète en laboratoire. Stand Ifsttar, 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sept. 2-6, Paris, France
- [COM16] Chevalier, C. (2013) Measurement of sensitivity of soils and sediments to erosion,. Two-pHase modElling for Sediment dynamics, THESIS-2013, June 10-12, 2013, Chatou - France
- [COM17] Chevalier, C. (2012) Mesure de la sensibilité à l'érosion. 9ème édition des Journées Scientifiques et Techniques du CETMEF, 3-5 déc., Paris, France
- [COM18] Chevalier, C. (2012) Présentation du guide « Erosion ». Journées du CFG, 23 mars, Lyon, France
- [COM19] Chevalier T., Clain X., Chevalier C., Dupla J.C., Canou J., & Coussot P. (2012) Injection of yield stress fluid through porous medium. 16th International Congress on Rheology, Aug. 5-10 Lisbon, Portugal
- [COM20] Chevalier, C., Durand, E. & Pham Van Bang, D. (2011) Présentation de l'opération de recherche DOFEAS « Digues et Ouvrages Fluviaux : Erosion, Affouillements et Séismes ». Journées techniques « Diagnostic et Surveillance des Digues, de la Recherche à la Pratique », 16-17 nov., Orléans, France
- [COM21] Chevalier, C. & Reiffsteck, P. (2011) Les essais de caractérisation des matériaux en laboratoire et sur terrain. Journées techniques « Diagnostic et Surveillance des Digues, de la Recherche à la Pratique », 16-17 nov., Orléans, France
- [COM22] Canou, J., Chevalier, C., Coussot, P. & Dupla, J.C. (2010) Injection et colmatage dans les milieux poreux. Séminaire « Collaborations entre sites du LCPC », 25-26 mars, Ecole des Ponts ParisTech, Marne-la-Vallée, France
- [COM23] Chevalier, C., Duc, M., Guédon, S., Pham, T.L. & Reiffsteck, P. (2009) Erosion and dispersion of soils by water, presentation and comparison of different tests. ASME-ASCE-SES conference, June, Virginia Tech, USA
- [COM24] Chevalier, C. (2009) Évaluation de la sensibilité des sols face aux risques érosifs : revue d'essais menés à différentes échelles. Journée technique du CFMS « Érosion et ouvrages géotechniques », 9 déc., Paris, France

- [COM25] Chevalier, C. (2009) Évaluation de la sensibilité des sols face aux risques érosifs : revue d'essais menés à différentes échelles. Journées « Eau et environnement » du LCPC, 25-27 nov., Bordeaux, France
- [COM26] Chevalier, C. & Reiffsteck, P. (2009) Activités expérimentales de la division MSRGI. Symposium « Nouvelle réglementation, nouvelles méthodes de diagnostic de sécurité des digues, avancées du projet de recherche ERINOH », 23 oct., Arles, France
- [COM27] Pham, T.L., Chevalier, C., Reiffsteck, P., Duc, M. & Guédon, S. (2008) Érosion et dispersion des sols : approches, résultats et perspectives. Journées « Géotechnique » du LCPC, 18-20 nov., Seillac, France
- [COM28] Bonelli, S., Chevalier, C., Marot, D., Faure, Y.H. & Benamar, A. (2008) ANR ERINOH : Essais de laboratoire. Journées « Géotechnique » du LCPC, 18-20 nov., Seillac, France
- [COM29] Pham, T.L., Reiffsteck, Chevalier, C. & Tacita, J.L. (2007) Mobile Water Jets test apparatus. 2nd YELGIP International Workshop, 20-21 Nov., LCPC, Paris, France
- [COM30] Chevalier, C., Lindner, A. & Clément, E. (2007) Some observations on granular suspension flow in a confined geometry. Workshop "Viscoplastic Fluids : From Theory to Application", 14-18 Oct., Monte-Verita, Switzerland
- [COM31] Lindner, A., Chevalier, C. & Clément, E. (2007) Destabilization of a Saffman-Taylor finger in a granular suspension. APS DFD Annual meeting, nov., Salt Lake City, USA
- [COM32] Chevalier, C., Lindner, A. & Clément, E. (2006) Formation de fractures par injection d'air dans un milieu poreux saturé et mal consolidé. 26-27 janv., ESPCI, Paris, France
- [COM33] Chevalier, C., Lindner, A. & Clément, E. (2005) Air Injection in a saturated and weakly consolidated porous media. Ecole d'été, Août, Cargèse, France
- [COM34] Chevalier, C., Ben-Amar, M., Bonn, D. & Lindner, A. (2005) Instabilité de Saffman-Taylor : Effets d'inertie. Journées de Physique Statistique. 27-28 janv., ESPCI, Paris, France
- [COM35] Chevalier, C., Lindner, A. & Clément, E. (2004) Pattern formation by injection of air in a non-Brownian suspension. APS DFD Annual meeting, nov., Seattle, USA

2.7 Expertises d'articles ou de projets

- [EXPE1] Advances in Civil Engineering
- [EXPE2] Environmental Fluid Mechanics
- [EXPE3] European Journal of Environmental and Civil Engineering
- [EXPE4] Geotechnical and Geological Engineering
- [EXPE5] Geotechnical Testing Journal
- [EXPE6] Géotechnique Letters

- [EXPE7] Hydrological Processes
- [EXPE8] Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering
- [EXPE9] Materials and Structures
- [EXPE10] Natural Hazards
- [EXPE11] Scientific Reports
- [EXPE12] Soils and Foundations
- [EXPE13] Transport in Porous Media
- [EXPE14] Revue Française de Géotechnique
- [EXPE15] Conférences ICSE2012, ICSE2014, ICSE2016
- [EXPE16] Conférences JNGG2016, JNGG2018
- [EXPE17] Conférences ICSMGE2017, ICSMGE2022
- [EXPE18] AAP « ANR »
- [EXPE19] AAP « AGIR » - Pôle PAGE
- [EXPE20] AAP « C2D2 »
- [EXPE21] AAP « GAČR » Fondation tchèque pour la recherche

3 Administration de la recherche

3.1 Animation d'équipe

Depuis Nov. 2017 : Directeur adjoint du Département GERS « Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la Terre » à l'Ifsttar / Université Gustave Eiffel

Mai 2010-Fév. 2020 : Chef de groupe puis Directeur du Laboratoire SRO « Sols, Roches et Ouvrages géotechniques » au sein du département GERS à l'Ifsttar / Université Gustave Eiffel

3.2 Responsabilités de projets de recherche ou de développement

Projets de recherche

2021-2023 : Responsable du suivi scientifique et budgétaire de la convention DGITM (Direction Générale des Infrastructures, des Transports et des Mobilités)-Univ. Eiffel 2021 pour l'ensemble des actions proposées

2017-2022 : Responsable pour l'Université Eiffel (Ifsttar) du projet CPER-FEDER Digue2020 « Plateforme de recherche pour les digues maritimes de protection contre les submersions » avec Inrae (Irstéa), Cerema, UMR Espace et Symadrem

2015-2019 : Responsable du projet ANR SSHEAR « Sols, Structures et Hydraulique : expertise et Recherche Appliquée » avec Cerema, UMR FAST, SNCF Réseau, Cofiroute et IRT Railenium

2010-2014 : Responsable de l'opération de recherche DOFEAS « Dignes et Ouvrages fluviaux, Erosion, Affouillements et Séismes » co-gérée avec le Cerema

2010-2013 : Convention de recherche partenariale avec LHOIST sur « la caractérisation de l'érodabilité des sols traités à la chaux », en collaboration avec Irstéa (Inrae), CETE Normandie-Centre (Cerema) et EDF

Projets de développement

2020-2022 : Responsable de l'initiative ciblée « Erodimètre in situ »

3.3 Participation à des projets de recherche ou de développement

Projets de recherche

Depuis 2021 : Participation au projet Ponts Connectés IA² « Indicateur Adimensionnel par Instrumentation et Assimilation de données pour le contrôle de santé des ouvrages. Application aux cas des affouillements »

2021-2023 : Responsable de l'action « Suivi des affouillements : retours d'expérience et propositions méthodologiques d'instrumentation » de la convention DGITM-Univ. Eiffel 2021

Depuis 2019 : Participation au projet européen (Horizon2020) PANOPTIS "Development of a Decision Support System for increasing the Resilience of Transportation Infrastructure based on combined use of terrestrial and airborne sensors and advanced modelling tools"

2018-2021 : Responsable de l'action « Quantification de la durabilité d'une digue sol-chaux en site maritime » des conventions DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques)-Ifsttar 2018-2019-2020

2013-2020 : Participation à la convention de partenariat de recherche et développement DREAL Centre-Ifsttar

2007-2013 : Participation aux projet ANR et Projet National (PN) ERINOH « Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques »

3.4 Animation scientifique

Depuis 2021 : Coordinateur du groupe de travail « Instrumentation des ouvrages géotechniques » du CFMS pour l'écriture d'un guide technique sur ce sujet

2015-2021 : Membre de la commission technique du Comité Français de Mécanique des Sols et de la Géotechnique (CFMS) pour 2 mandats

Depuis 2010 : Représentant français au Technical Committee 213 "Scour and Erosion" de la Société Internationale de Mécanique des Sols et de la Géotechnique (SIMSG)

Depuis 2013 : Représentant de l'Ifsttar / Université Gustave Eiffel au Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) Hydraulique pour l'Environnement et le Développement Durable (HED2)

3.5 Coopérations internationales

Depuis 2018 : Développement d'une collaboration de recherche avec l'université de Tokyo / département de génie Civil

— Signature en 2020 d'un « master agreement » (5 ans) entre l'université Gustave Eiffel et l'université de Tokyo (faculté d'ingénierie et institut des sciences industrielles)

— Réalisation d'un projet de recherche international 2020-2022 pour l'accueil de K. Watanabe en chercheur invité

Depuis 2014 : Développement d'une collaboration de recherche avec le Railway Technical Research Institute (RTRI) de Tokyo (Japon) sur l'ingénierie géotechnique et les risques naturels

- Signature en 2017 d'une convention générale (5 ans) avec une action (2 ans) sur l'érosion et les affouillements
- Signature en 2019 d'une nouvelle action (2 ans) sur l'érosion et les affouillements
- Signature en 2022 d'une nouvelle convention générale (5 ans) avec poursuite d'une action (2 ans) sur l'érosion et les affouillements

Depuis 2016 : Recherche de collaboration avec Deltares (Pays-Bas), préparation d'un « memorandum » sur l'érosion et les affouillements

Depuis 2010 : Echanges scientifiques avec le Turner-Fairbank Highway Research Center (TFHRC) et la Federal Highway Administration (FHWA) sur les moyens d'essais et la caractérisation de l'érosion

3.6 Organisation de congrès ou journées techniques

Congrès

Co-organisateur des 9èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG), Champs-sur-Marne, du 13 au 15 juin 2018

Co-organisateur (*co-chair*) de la 6ème "International Conference on Scour and Erosion" (ICSE-6), Paris, du 27 au 31 août 2012

Participation aux comités scientifiques de l'ICSE-6 (Paris, France, 2012), de l'ICSE-7 (Perth, Australie, 2014), de l'ICSE-8 (Oxford, Grande Bretagne, 2016), de l'ICSE-10 (Arlington, VA, USA, 2021) et de l'ICSE-11 (Copenhague, Danemark, 2023)

Journées et rencontres techniques

Co-organisateur de la journée scientifique et technique du CFMS « Adaptation des ouvrages aux défis du changement climatique et du développement durable », Champs-sur-Marne, 9 décembre 2021

Organisateur de la journée publique de restitution du projet ANR SSHEAR, Champs-sur-Marne le 11 septembre 2019

Organisateur d'un Workshop RTRI-Ifsttar-Université de Tokyo-ANR SSHEAR sur la thématique « affouillement et érosion », Champs-sur-Marne, du 27 au 29 novembre 2018

Membre du comité d'organisation de la journée technique CFBR - CFMS - SPTF FNTP « Conception et construction des ouvrages en sols fins », Villeurbanne, 16 mai 2019

Organisateur de la rencontre technique « RTRI-Ifsttar technical meeting », Champs-sur-Marne, du 20 au 23 juin 2016

Co-organisateur de la journée technique « Gestion des risques hydrologiques et des ouvrages fluviaux », Aix-en-Provence, Novembre 2014

Co-organisateur de la journée technique « Diagnostic et Surveillance des Dignes, de la Recherche à la Pratique », Orléans, Novembre 2011

3.7 Diffusion de l'information et de la culture scientifique et technique

Conférences

- Chevalier, C. et al., Journée publique de restitution du projet ANR SSHEAR, Champs sur Marne, le 11 septembre 2019
- Chevalier, C. et al., Projets en cours : Digue2020, SSHEAR Ouvrages à la mer, suivi des sites, Séminaire « Littoraux et territoires inondés », Paris, 18 octobre 2018
- Chevalier, C. et al., Présentation du projet SSHEAR, INNOV'DAY RAIL, Le futur de la recherche ferroviaire, Champs-sur-Marne, 29 juin 2017
- Chevalier, C., Présentation du projet SSHEAR, table ronde « Risques Naturels », Décennies de l'Ifsttar - Aujourd'hui l'Ifsttar, Champs-sur-Marne, 22-23 septembre 2016
- Chevalier C., Reiffsteck P., Pham T.L., Duc M. & Guédon, S. (2009) Érosion interne et externe des sols compactés. 6ème édition des Journées de l'Environnement : Mécanique des Sols Agricoles, Institut LaSalle Beauvais, 26 mars 2009

Expositions, stands, visites

- 2e et 3e éditions des « Future Days », Visite des laboratoires de l'unité aux étudiants et au public, novembre 2018 et novembre 2019
- Assises Nationales des Risques Naturels, Stand commun Cerema-Ifsttar-Irstea, Marseille, 22 et 23 Mars 2016
- Journée « portes ouvertes, imaginer un génie civil durable », 60 ans du LCPC, CNAM, Paris, 30 novembre 2009
- Journées « portes ouvertes », 60 ans du LCPC, Nantes, 23 au 26 septembre 2009

Communications écrites

- Prévenir les submersions marines avec la plateforme de recherche - observatoire DIGUE 2020, Appui aux politiques publiques : Regards sur l'année 2021, Université Gustave Eiffel, juillet 2022
- Chevalier, C., Dubreucq, T. & Rajot, J.P. Imaginer l'infrastructure en fonction du terrain naturel, Dossier thématique 10 de l'Ifsttar « Le système ferroviaire au cœur des transports », versions française et anglaise, 2019
- Projet SSHEAR : de solides recommandations pour préserver les ponts et ouvrages fluviaux, Trajectoire, le magazine de l'Ifsttar, n° 17, Décembre 2019
- Quand les crues abîment les ponts, Trajectoire, le magazine de l'Ifsttar, n° 12, Novembre 2016
- Etudier l'érosion des cours d'eau et sécuriser les fondations des ponts, Trajectoire, le magazine de l'Ifsttar, n° 9, Avril 2015

3.8 Recherche de contrats et réponses à appels à projets

Porteur de la réponse à l'AAP ANR Générique 2023, « BRIIDGE : Building for Rivers Infrastructures, Instrumentation and Devices Guiding their sustainable Exploitation », Univ. Eiffel porteur du projet, 6 partenaires avec ENPC/laboratoire d'Hydraulique St Venant, CEREMA, INRAE, OSMOS Group et Ubertone

Porteur de la réponse à l'AAP ANR Générique 2022, « DINOSOR : Développements Instrumentaux et Numériques pour une Optimisation du Suivi des Ouvrages en Rivières », Univ. Eiffel porteur du projet, 11 partenaires avec laboratoire d'Hydraulique St Venant, CEREMA, INRAE, Univ. Tours, OSMOS Group, Ubertone, EDF lab., Cofiroute et SNCF Réseau

Porteur de la réponse à l'AAP ANR Générique 2021, « DINOSOR : Développements Instrumentaux et Numériques pour une Optimisation du Suivi des Ouvrages en Rivières », Univ. Eiffel porteur du projet, 11 partenaires avec laboratoire d'Hydraulique St Venant, CEREMA, INRAE, Univ. Tours, OSMOS Group, Ubertone, EDF lab., Cofiroute et SNCF Réseau

Responsable scientifique pour l'Univ. Eiffel de la réponse à l'AAP H2020-MSCA-ITN-2020, « POSEIDON : improve infrastructure resilience against hydro-hazards towards a changing climate »

Contribution au projet PORTE « Plateforme d'observation et de suivi des risques naturels en région PACA afin de renforcer la résilience des territoires », volet CPER et FEDER PACA 2014 à 2020

Coordinateur de la réponse à l'AAP ANR Blanc 2011, « MEMPhA : Étude multi-échelle et multi-phasique des affouillements », Ifsttar porteur du projet, 4 partenaires dont laboratoire d'Hydraulique St Venant, laboratoire FAST (physique et mécanique), ESTP

Coordinateur de la réponse à l'AAP ANR Blanc 2010, « MuScA : Analyse multi-sciences du risque d'affouillements », LCPC porteur du projet, 4 partenaires dont laboratoire d'Hydraulique St Venant, laboratoire FAST (physique et mécanique), laboratoire GRID-GREGOR (sciences socio-économiques)

Coordinateur de la réponse à l'AAP ANR Risques Naturels 2009, « MuScA : Analyse multi-sciences du risque d'Affouillements », LCPC porteur du projet, 9 partenaires dont laboratoire d'Hydraulique St Venant, SAIPEM, EDF R&D

4 Activités de formation

4.1 Enseignements

École des Ponts ParisTech, 1ère année, cours et TD de Physique Statistique appliquée aux Systèmes complexes (cours d'ouverture avec L. Brochard) (depuis 2015-2016)

École des Ponts ParisTech, 1ère année, TD de Physique Statistique et encadrement de travaux collectifs (depuis 2009-2010)

ENSTA, IP Paris, Master international génie maritime ; conférence "Scour at marine and coastal structures" (depuis 2017-2018)

ENSTA, 1ère année, TD de mécanique des fluides incompressibles (4 années entre 2007 et 2012)

ENSTA, 2ème année (M1), TD d'écoulements diphasiques (3 années entre 2009 et 2013)

4.2 Encadrement de doctorants et post-doctorants

- [1] D. Ayssami (2022-2025) « Analyse des phénomènes d'érosion interne sur digues fluviales par méthode hybride expérimentale-numériques » (directeur de thèse : P. Reiffsteck) : co-directeur
- [2] T. Wang (2020-2023) « Application des méthodes des réseaux de neurones au diagnostic et à la gestion des fondations en site aquatique (FSA) du patrimoine ouvrages d'art SNCF » (directeur de thèse : P. Reiffsteck - thèse CIFRE SNCF) : co-directeur
- [3] M. Belmokhtar (2019-2022) « Modélisation, analyse et apprentissage statistique du comportement dynamique des structures pour le suivi des conditions aux limites : application au phénomène d'affouillement » (directrice de thèse : F. Schmidt - co-encadrement EMGCU-SRO) : co-directeur
- [4] S. Ientile (post-doc 2 ans, 2019-2021) « projet PANOPTIS : vulnérabilité des ouvrages d'art, résilience, systèmes complexes » : conseiller
- [5] M. de Baecque (2016-2019) « Caractérisation multi-physique et étude de la durabilité des sols traités à la chaux en vue d'une application aux digues maritimes » (directeur de thèse : P. Reiffsteck) : conseiller d'étude principal
- [6] N. Boujia (2015-2018) « Vulnérabilité des ouvrages d'art aux risques d'affouillement des fondations » (directeur de thèse : D. Pham Van Bang - co-encadrement EMGCU-SRO) : conseiller d'étude
- [7] E. Florens (post-doc 1 an, 2017-2018) « Caractérisation et instrumentalisation améliorées des sites au regard des problèmes d'affouillement des structures » (avec l'IRT Railenium) : superviseur scientifique

- [8] O. Ndoye (2015 - thèse arrêtée en mars 2017) « Amélioration de la caractérisation et du suivi des sites et des ouvrages affouillables » (directeur de thèse : D. Pham Van Bang) : conseiller d'étude principal
- [9] R. Fellag (2012-2016) « Phénomènes d'érosion interne dans les graves et les sols grossiers : Applications aux digues et aux barrages » (directeur de thèse : JC Dupla - co-encadrement Navier-SRO) : conseiller d'étude
- [10] T. Chevalier (2010-2013) « Ecoulements de fluides à seuil en milieux confinés » (directeur de thèse : P. Coussot - co-encadrement Navier-GER2) : conseiller d'étude
- [11] I. Haghghi (2009-2012) « De la suffusion à l'affouillement des ouvrages géotechniques : développement des phénomènes d'érosion et de dispersion dans les sols » (directeur de thèse : P. Reiffsteck) : conseiller d'étude principal
- [12] Q.Q. Truong (2009-2012) « Etude des mécanismes de blocage d'un écoulement par un produit de colmatage » (directeur de thèse : J.C. Dupla - co-encadrement Navier-GER2) : conseiller d'étude
- [13] X. Clain (2007-2010) « Etude expérimentale de l'injection de fluides d'Herschel-Bulkley en milieu poreux » (directeur de thèse : P. Coussot - co-encadrement Navier-MSRGI) : conseiller d'étude principal
- [14] T.L. Pham (2005-2008) « Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide » (directrice de thèse : S. Guédon) : conseiller d'étude

4.3 Encadrement de stagiaires

- [1] E. Chassagneux (2022), « Essais d'impact sur structures en modèle réduit pour la détection d'affouillements », PFE, ENTPE
- [2] A. Bonnot (2022) « Vibration monitoring d'un ouvrage affouillé & data science : développement d'une méthode de discrimination automatisée », stage 2e année, ENTPE
- [3] G. Menor Teran (2021) « Recalcul des digues verticales en béton armé : approches déterministe et fiabiliste, recommandations pour les textes normatifs », stage ingénieur 5A, INSA Lyon
- [4] L. Leprince (2021) « Prédiction des propriétés morphologiques et mécaniques de microstructures aléatoires hétérogènes », Master 2 Intelligence artificielle, systèmes, données, Univ. Paris-Dauphine-PSL
- [5] J. Pannier (2020) « Étude de l'affouillement : traitement de données de monitoring », stage assistant ingénieur, UTC
- [6] M. Belmokhtar (2019) « Modélisation analytique de problèmes inverses pour la détermination de conditions limites ou chargements évolutifs », Master Sol et Infrastructure et TFE, ENTPE
- [7] A. Ditsingouli (2019) « Étude de l'affouillement d'un pont : traitement des données », Master 2 Sciences de la Terre et des Planètes, Environnement, Univ. Caen
- [8] X. Si (2019) « Modèle d'Interaction Sol-Structure pour le suivi d'affouillement », Projet de Recherche, ENSTA, IP Paris
- [9] L. Kad (2018) « Caractérisation de l'érodabilité des sols cohésifs et des sédiments naturels - Wheel Erosion Test (WET) », Master 2 Génie Civil, Univ. Grenoble INP

- [10] M. Magallon-Casiano (2018) « Limon traité à la chaux soumis à l'eau de mer », Master 1 Génie Civil, Univ. Lorraine
- [11] M.C. Kotelon (2017) « Caractérisation de l'érodabilité des sols cohésifs et des sédiments naturels », Master 2 Dynamique des fluides, Univ. Paris-Saclay
- [12] A. Fauvez (2017), « Établissement d'un document type "cahier des charges" pour la définition d'un nouvel essai d'érosion (2e version) », DUT science et génie des matériaux, IUT St Denis
- [13] J. Lonchamp (2016) « Vulnérabilité des ouvrages d'art aux phénomènes d'affouillements », Master 1 Géologie-Géotechnique, UPMC
- [14] J. Lonchamp (2016) « Modélisation numérique de la dégradation des ouvrages hydrauliques en terre », PIR Master 2 MSROE, UPMC
- [15] A. Tran (2016) « Développement d'un prototype de système de surveillance des affouillements », Master 1, UTC (Compiègne)
- [16] O. Ndoye (2015) « Caractérisation de l'érodabilité des sols », Master 2 Géologie-Géotechnique, UPMC
- [17] F. Lachaussée (2015) « Étude expérimentale de la rupture de digues en terre par surverse », F. Lachaussée, Master 2 Physique et applications, UPMC - ENS Ulm
- [18] V.H. Pham (2015) « Affouillement des piles de ponts : état de l'art des dispositifs d'essais existants », PIR Master 2 MSROE, UPMC
- [19] F. Pelosi (2014) « Characterization of fine sediments and soils erodibility », Master 2 IMACS, Univ. Poitiers
- [20] T. Albenque (2012) « Influence des propriétés physico-chimique de l'eau lors des phénomènes d'érosion », Master 2 MSROE, UPMC
- [21] K. Belarbi (2012) « Étude de la sensibilité à l'érosion de sols utilisés dans les ouvrages en terre de protection contre les crues et les inondations », thésard invité, Univ. Tlemcen (Algérie)
- [22] A. Jerez Loaiza (2011) « Etude et suivi de l'érosion des sédiments en contexte immergé », PFE, INSA Rennes
- [23] K. Belarbi (2011) « Application de l'essai d'érosion de trou à des sols naturels », thésard invité, Univ. Tlemcen (Algérie)
- [24] H Hoang (2009) « Erodimètre à Jets Mobiles », Master 2 MSROE, Univ. Paris-Est
- [25] B.D. Hoa (2009) « Essai d'érosion de trou », Master 2 MSROE, Univ. Paris-Est
- [26] T. Martin (2009) « Élaboration et analyse d'un nouvel essai expérimental pour comprendre l'émiettement des sols », Stage de recherche, Ecole Polytechnique
- [27] M. Imbert (2009) « Caractérisation de la sensibilité à l'érosion par des essais d'Erodimètre », Master 1 Ingénierie et Géosciences du Littoral, Univ. Caen
- [28] X. Lelong (2008) « Affouillement des piles de ponts : état de l'art des travaux expérimentaux », PIR Master 2 MSROE, Univ. Paris-Est
- [29] L. Pitre (2008) « Contribution à l'évaluation de l'érodabilité interne des sols », TFE, ENTPE
- [30] M. Leroux (2006) Injection dans des suspensions granulaires denses », Master Matière condensée, ENS Lyon
- [31] X. Clain (2005) « Injection d'air dans des suspensions granulaires en cellule de Hele-Shaw », Master 1 Fluides Complexes et Milieux Divisés, Univ. Paris 6

4.4 Participation à des jurys de thèse

- [1] S. Youssef, soutenance de thèse « Érosion de la surface du sol : loi locale et influence des propriétés du sol et de l'écoulement sur la résistance à l'érosion des structures hydrauliques », Aix-Marseille Université, le 21 juin 2023 : examinateur
- [2] M. Belmokhtar, soutenance de thèse « Modélisation, analyse et apprentissage statistique du comportement dynamique des structures pour le suivi des conditions aux limites : application au phénomène d'affouillement », Université Gustave Eiffel, le 19 décembre 2022 : examinateur
- [3] M. de Baecque, soutenance de thèse « Caractérisation multi-physique et étude de la durabilité des sols traités à la chaux en vue d'une application aux digues maritimes », Université Paris-Est, le 17 décembre 2019 : membre invité
- [4] W. Zhang, soutenance de thèse « Simulation numérique 3D d'affouillements et d'érosion près d'un obstacle », Université Paris-Est, le 13 septembre 2019 : examinateur
- [5] F. Lachaussée, soutenance de thèse « Érosion et transport de particules au voisinage d'un obstacle », Université Paris-Saclay, le 14 novembre 2018 : membre invité
- [6] N. Boujia, soutenance de thèse « Vulnérabilité des ouvrages d'art aux risques d'affouillement des fondations », Université Paris-Est, le 17 septembre 2018 : examinateur
- [7] R. Fellag, soutenance de thèse « Phénomènes d'érosion interne dans les graves et les sols grossiers : Applications aux digues et aux barrages », Université Paris-Est, le 15 décembre 2016 : examinateur
- [8] A. Mehenni, soutenance de thèse « Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités », Université de Lorraine, le 15 décembre 2015 : examinateur
- [9] T. Chevalier, soutenance de thèse « Injection de fluides non-newtoniens en milieu poreux », Université Paris-Est, le 24 octobre 2013 : membre invité
- [10] Q.Q. Truong, soutenance de thèse « Etude des mécanismes de blocage d'un écoulement par un produit de colmatage », Université Paris-Est, le 20 décembre 2012 : examinateur
- [11] I. Haghighi, soutenance de thèse « De la suffusion à l'affouillement des ouvrages géotechniques : développement des phénomènes d'érosion et de dispersion dans les sols », Université Paris-Est, le 24 septembre 2012 : examinateur
- [12] H.H. Nguyen, soutenance de thèse « Caractérisation de mécanismes d'érosion interne : confrontation d'érodimètres et d'approches », Université de Nantes, le 4 juillet 2012 : examinateur
- [13] X. Clain, soutenance de thèse « Etude expérimentale de l'injection de fluides d'Herschel-Bulkley en milieu poreux », Université Paris-Est, le 4 octobre 2010 : examinateur
- [14] TL Pham, soutenance de thèse « Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 29 septembre 2008 : membre invité

5 Transfert, application et valorisation des connaissances

5.1 Développement et maintenance d'appareillages

- Essai d'érosion de pompe (PumpET : Pump Erosion Test) : conception et utilisation
Maquette pédagogique « submersions rapides et protections associées » du département GERS : contributions au développement et à la conception
- Essai d'érosion de roue (WET : Wheel Erosion Test) : conception, réalisation et utilisation
- Essai d'érosion de trou (HET : Hole Erosion Test) : amélioration, nouveaux développements et utilisation
- Essai d'érodimètre à jets mobiles (MoJET : Mobile Jets Erosion Test) : amélioration, nouveaux développements et utilisation
- Essai d'émiettage amélioré (ECT : Enhanced Crumb Test) : amélioration, nouveaux développements et utilisation

5.2 Rapports de recherche, d'expertises ou d'essais

- [1] Chevalier C., Belmokhtar M., Larrarte F. & Schmidt F. (2023) Rapport d'avancement à 12 mois de l'action DGITM Suivi des affouillements : retour d'expérience et propositions méthodologiques d'instrumentation, juillet 2023, 18 pages
- [2] Chevalier C. & Coppee T. (2022) Rapport d'essais à l'Érodimètre à Jets Mobiles - Digue témoin du canal Seine Nord Europe à Cizancourt (80), 3ème campagne (12 avril 2022), pour la SCSNE, mai 2022, 13 pages + annexes
- [3] Chevalier C. & Coppee T. (2021) Rapport d'essais à l'Érodimètre à Jets Mobiles - Digue témoin du canal Seine Nord Europe à Cizancourt (80), 2ème campagne (25 juin 2021), pour la SCSNE, septembre 2021, 13 pages + annexes
- [4] Chevalier C., Palma-Lopes S., Leparoux D. & Hemmati S. (2021) Quantification de la durabilité d'une digue sol-chaux en site maritime, Compte rendu des travaux de l'action 5 de la convention DGPR-Univ. Eiffel 2020, mars 2021, 25 pages
- [5] Chevalier C. & Coppee T. (2021) Rapport d'essais à l'Érodimètre à Jets Mobiles - Digue témoin du canal Seine Nord Europe à Cizancourt (80), 1ère campagne (23 novembre 2020), pour la SCSNE, janvier 2021, 13 pages + annexes
- [6] Palma-Lopes S., Leparoux D., Devie T., Gugole G., Wang A. & Chevalier C. (2020) Rapport scientifique de réalisation et d'analyse des mesures effectuées sur la plateforme DIGUE 2020 - Module 3, décembre 2020, 29 pages

-
- [7] Chevalier C., Palma-Lopes S. & Hemmati S. (2020) Rapport final d'avancement du Module 3 du projet CPER FEDER PACA Digue2020, décembre 2020, 10 pages
 - [8] Palma-Lopes S., Leparoux D., Devie T., Gugole G., Wang A. & Chevalier C.(2020) Rapport de description du dispositif instrumental de la plateforme DIGUE 2020 - Module 3, novembre 2020, 16 pages
 - [9] Chevalier C. (2019) Compte-rendu de fin de projet ANR SSHEAR, novembre 2019, 20 pages
 - [10] Chevalier C., De Baecque M., Palma-Lopes S., Hemmati S., Gendrey S., Tekatlian A. & Jeanniot C. (2019) Rapport annuel d'avancement du Module 3 du projet CPER FEDER PACA Digue2020, octobre 2019, 15 pages + annexes
 - [11] Chevalier C., Palma-Lopes S. & De Baecque M. (2020) Quantification de la durabilité d'une digue sol-chaux en site maritime, Compte rendu des travaux de l'action 5 de la convention DGPR-Ifsttar 2019, mai 2020, 23 pages
 - [12] Chevalier C. (2019) Rapport d'essais à l'Érodimètre à Jets Mobiles sur le Déversoir de La Bouillie, pour la DREAL Centre, 18 pages + annexes
 - [13] De Baecque M., Chevalier C., Guédon S. & Palma-Lopes S. (2019) Quantification de la durabilité d'une digue sol-chaux en site maritime, Compte rendu des travaux de l'action 5 de la convention DGPR-Ifsttar 2018, mars 2019, 36 pages
 - [14] Chevalier C. (2018) Compte-rendu intermédiaire à 42 mois du projet ANR SSHEAR, juillet 2018, 15 pages + annexes
 - [15] Chevalier C., De Baecque M., Le Feuvre M., Hemmati S., Palma-Lopes S., Szymkiewicz F. & Gendrey S. (2018) Rapport de définition du dispositif instrumental du Module 3 du projet CPER FEDER PACA Digue2020, mars 2018, 12 pages
 - [16] Chevalier C., De Baecque M., Gendrey S. & Tekatlian A. (2018) Rapport annuel d'avancement du Module 3 du projet CPER FEDER PACA Digue2020, février 2018, 12 pages + annexes
 - [17] Chevalier C. (2017) Compte-rendu intermédiaire à 30 mois du projet ANR SSHEAR, juin 2017, 13 pages + annexes
 - [18] Chevalier C. (2016) Compte-rendu intermédiaire à 18 mois du projet ANR SSHEAR, juin 2016, 10 pages + annexes
 - [19] Chevalier C. & Ndoye O. (2015) Rapport d'essais à l'Érodimètre à Jets Mobiles sur le Déversoir de Jargeau, pour la DREAL Centre, juin 2015, 34 pages
 - [20] Chevalier C. (2013) Comportement des sols traités à la chaux face aux phénomènes d'érosion : Essais en laboratoire et sur ouvrages, pour l'entreprise LHOIST, décembre 2013, 42 pages
 - [21] Chevalier C. & Fanelli F. (2012) Propriétés de cohésion de « mélanges », pour Saint-Gobain Recherche, 3 rapports, 30 pages
 - [22] Chevalier C., Haghghi I. & Reiffsteck P. (2012) Rapport d'essais à l'Érodimètre à Jets Mobiles sur le Déversoir de Montlivault (41), pour la DREAL Centre, février 2012, 44 pages
 - [23] Chevalier C. & Haghghi I. (2012) Sol prélevé sur les digues du Canal du Nord : Rapport d'essais d'érosion de trou (HET), pour l'OR Dofeas, janvier 2012, 19 pages

- [24] Chevalier C. & Haghghi I. (2011) Rapport d'étude sur le comportement du sol traité à la chaux face à l'érosion, Campagne d'essais sur ouvrages, avec l'entreprise LHOIST et le CER de Rouen, décembre 2011, 34 pages
- [25] Chevalier C. & Reiffsteck P. (2010) Participation à la rédaction des livrables - Coordination du livrable « Guide ERINOH sur les essais de laboratoire » & Rédaction du Chapitre 5 du traité MIM « Erosion des Géomatériaux », pour le PN ERINOH, octobre 2010,
- [26] Chevalier C. & Haghghi I. (2010) Confrontation de caractérisations de la sensibilité à l'érosion - Essais d'Erosion de Trou avec le dispositif HET du LCPC, pour le PN ERINOH, septembre 2010, 17 pages
- [27] Chevalier C. (2010) Essais à l'Erodimètre à Jets Mobiles LCPC - Campagne d'essais sur le canal de Briare à Montcresson (45), pour le PN ERINOH, juin 2010, 37 pages
- [28] Chevalier C. & Reiffsteck, P. (2009) Essais à l'Erodimètre à Jets Mobiles sur la levée de l'Authion, pour le PN ERINOH, août 2009, 38 pages
- [29] Chevalier C. (2009) Participation à la rédaction du rapport final de l'ANR ERINOH, Avril 2009
- [30] Reiffsteck P., Pham T.L., Tacita J.L. & Chevalier C. (2007) Essais d'érosion sur des sols agricoles, pour la société PRP, octobre 2007, 23 pages

5.3 Animation et responsabilités dans des réseaux ou commissions scientifiques et techniques

Membre (depuis 2018) de la commission scientifique « risques sol et sous-sol » de l'INERIS

Représentant français (depuis 2010) au TC 213 "Scour and Erosion" de la SIMSG (Société Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique)

Représentant de l'Univ. Eiffel/Ifsttar (depuis 2011) au GIS HED2 (Groupement d'Intérêt Scientifique Hydraulique pour l'Environnement et le Développement Durable)

Membre (élu en 2015, réélu en 2018) de la commission scientifique et technique du CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique)

Coordinateur (depuis 2021) du groupe de travail « Instrumentation des ouvrages géotechniques » du CFMS pour l'écriture d'un guide technique sur ce sujet

Animateur du sous-groupe « Drainage et Filtration » du Groupe de travail CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) « Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues en remblai »

Représentant de l'Univ. Eiffel dans le groupe de travail pour l'écriture de la feuille de route « Érosion » DGPR/opérateurs risques

Membre du groupe miroir français pour l'écriture de l'ILH "International Levee Handbook" (2013)

Deuxième partie

Synthèse des travaux de recherche

Introduction générale

Les ouvrages en sites fluviaux ou côtiers (digues, berges, ponts et ouvrages d'art) sont des éléments essentiels d'aménagement. Ils sont exposés à des processus de détérioration liés aux sollicitations saisonnières, cycliques ou exceptionnelles dont, notamment, les phénomènes hydrauliques causant érosion et affouillements. La défaillance de ces ouvrages entraîne un problème de sécurité des personnes, des biens, des risques pour l'environnement, une perte de bénéfices pour la société et des coupures de réseaux (eau, gaz, électricité, internet...) comme cela a pu être le cas lors des crues exceptionnelles du 2 octobre 2020 dans le département des Alpes-Maritimes (tempête Alex). C'est donc une préoccupation majeure des acteurs de l'aménagement et de la prévention des risques.

De manière plus exhaustive, les phénomènes d'érosion et d'affouillements se produisent aux pieds des piles de ponts, berges et structures (affouillements), au niveau des digues et des ouvrages de protection (érosion interne, surverse) notamment lors des phénomènes climatiques extrêmes (crues majeures pour les cours d'eau, tempête pour les ouvrages à la mer). Des processus d'érosion peuvent également être générés par la navigation via le battillage. La figure 1 illustre la diversité des situations rencontrées.



FIG. 1 – *Processus d'érosion : diversité des phénomènes et exemples de ruptures ou de désordres sur les ouvrages.*

Les phénomènes d'érosion et d'affouillements sur les ouvrages et les structures en rivière, sur la côte ou en mer sont particulièrement complexes à appréhender, comprendre et caractériser car ils sont à l'interface entre eau(x), sol(s) et structure(s) et recouvrent une grande variété de domaines scientifiques [57] : mécanique des sols et géotechnique, mécanique des fluides et hydraulique, mécanique des structures, sédimentologie, milieux poreux, physique et chimie des géomatériaux mais aussi analyse des systèmes complexes, approches économiques et sociales des risques...

J'ai, au cours des années passées à travailler sur ces sujets, développé une approche essentiellement expérimentale cherchant à caractériser les phénomènes en jeu à l'aide de lois simples s'appuyant la plupart du temps sur la compréhension physique des processus.

Ces lois simples sont nécessaires pour plusieurs raisons, notamment car :

- elles permettent généralement de rendre correctement compte des phénomènes observés ;
- elles permettent de cerner les grandeurs essentielles à la caractérisation des processus ;
- elles s'appliquent plus facilement à la réalité du terrain où des approches plus complexes (généralement à grand nombre de paramètres) peuvent être difficilement applicables sur des situations à fortes variabilité ou hétérogénéités ;
- elles peuvent être plus aisément implémentées numériquement.

Pour développer de nouvelles connaissances et contribuer à une meilleure prise en compte par la pratique des phénomènes d'érosion et d'affouillements, j'ai pu travailler ou collaborer sur de nombreux aspects liés à la caractérisation des matériaux et au suivi des ouvrages :

- caractérisation des propriétés des géomatériaux en interaction avec l'eau, notamment par le développement d'essais (dispositifs et protocoles) au laboratoire et sur le terrain ;
- reconnaissances et visites de site ;
- suivis de sites, d'ouvrages et de structures via des mesures hydrauliques, vibratoires ou géophysiques ;
- études paramétriques en milieu contrôlé (laboratoire) notamment sur les matériaux traités et dans le cas de l'étude des écoulements complexes ;
- études sur modèles réduits ou sur démonstrateurs en vraie grandeur ;
- analyse de risques et cotation d'ouvrages (ponts, piles ou culées) par rapport au risque d'affouillements.

Ces travaux sont nécessairement pluridisciplinaires et multi-échelles. Ils ont été menés dans le cadre de collaborations nombreuses, au sein du laboratoire SRO, du département GERS, du LCPC devenu Ifsttar puis Université Gustave Eiffel (départements MAST, COSYS et UMR Navier), au niveau national avec des centres et des laboratoires de recherche (Cerema, INRAE, laboratoires Saint-Venant, FAST, GeM...) mais également des acteurs économiques (SNCF Réseau, Vinci autoroutes, DREAL, SCSNE...) et, enfin,

au niveau international (TC 213 "Scour and Erosion" de l'ISSMGE et collaboration notable avec le Japon : RTRI et Université de Tokyo).

Comme indiqué dans le titre de ce manuscrit d'HDR, mes recherches mettent en interaction eau(x), sol(s) et structure(s) au pluriel :

- *eau(x)*, d'abord, car eau environnante (rivière ou mer) ou interstitielle, eau 'pure' ou eau salée, eau statique ou en écoulement, fluides complexes (...);
- *sol(s)*, ensuite, car sols de différentes natures (sable, limon, argile...), saturés (comme les sédiments) ou non, reconstitués ou naturels, aux propriétés physiques variées (densité, teneur en eau...), éventuellement traités (...);
- *structure(s)*, enfin, car ouvrages de différents types (digues, berges, ouvrages en terre, piles ou culées de ponts, éoliennes...), aux caractéristiques variées et à la structure plus ou moins complexe.

Pour présenter les travaux menés et leurs avancées, le document est ainsi structuré en 3 chapitres selon un découpage par processus :

- dans le chapitre 1 *Caractérisation des géomatériaux et des ouvrages en terre vis-à-vis des phénomènes d'érosion*, il sera ainsi plus particulièrement question des travaux faisant intervenir les sols et ouvrages en terre non-saturés en interaction avec l'eau (souvent en écoulement). Ce sont des situations typiquement rencontrées dans les cas de l'érosion interne de type écoulement de conduit et de la surverse;
- dans le chapitre 2 *Écoulements complexes dans les milieux poreux et les ouvrages en terre*, le sujet des milieux poreux, des sols ou des ouvrages en terre généralement saturés avec un écoulement interne plus ou moins complexe sera abordé. Ce sont des situations typiquement rencontrées dans les cas de l'érosion interne de type suffusion ou du colmatage;
- dans le chapitre 3 *Caractérisation et suivi des sites affouillables*, il sera enfin question des sols et sédiments saturés en interaction avec l'eau environnante en écoulement et des structures de génie civil. C'est ainsi le cas de l'affouillement des piles de ponts, des pieds de berges ou des structures maritimes.

Ce découpage par processus ou configuration, recouvre également, une structuration par actions, collaborations et projets de recherche comme il sera présenté dans les différents chapitres.

Il est à souligner que, dans la pratique comme dans certaines expériences, il y a recouvrement, enchaînement ou compétition entre ces processus.

Dans la pratique, c'est notamment le cas lorsque des scénarios de rupture d'ouvrages sont envisagés [39, 63, 64] comme illustrés à la figure 2 dans le cas d'une défaillance par brèche d'une digue. Une érosion externe entraîne ainsi un défaut dans l'étanchéité de la structure qui aboutit à un déclenchement d'érosion interne (régressive puis de conduit). Ces processus d'érosion menacent au final la stabilité mécanique du remblai et provoquent son effondrement.

Ces observations se retrouvent également expérimentalement comme illustré aux figures 3, 4 et 5. Une structure modèle (sol sablo-argileux non saturé et compacté) est

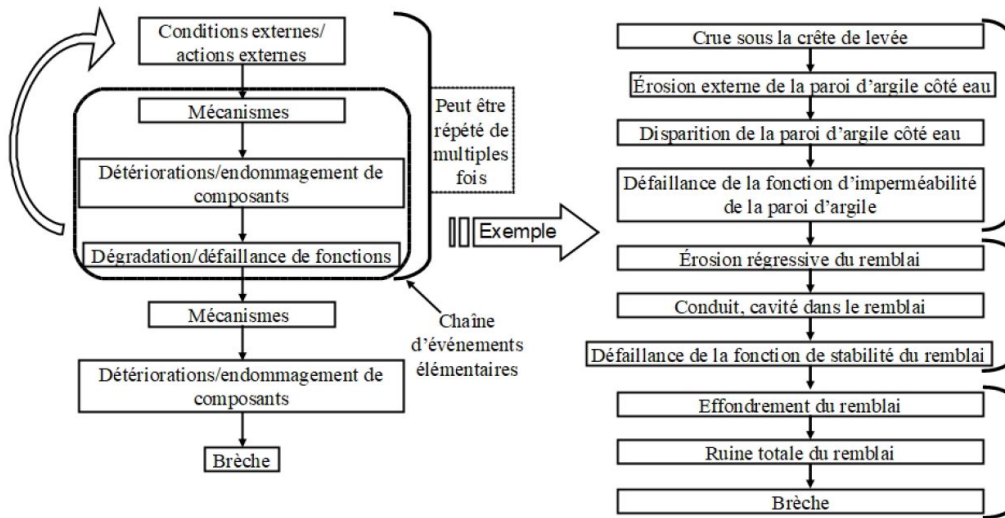


FIG. 2 – Scénarios et chaîne d'évènements conduisant à une défaillance structurelle de digue et à une brèche [64].

mise en charge et soumise à une surverse dans un canal d'essai hydraulique (Fig. 3) au Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant de Chatou [102].

L'observation de cette expérience à la figure 4 montre que les phénomènes s'enchaînent, en particulier l'érosion externe, la formation d'un conduit (en charge puis à surface libre) puis l'effondrement du remblai modèle.

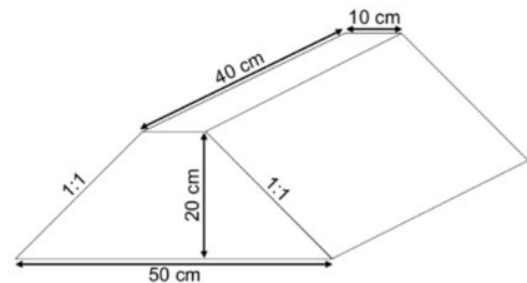


FIG. 3 – Canal hydraulique au Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant de Chatou et dimension de la digue modèle [102].

Une analyse plus fine des phénomènes révèle cependant que la structure subit deux processus ou attaques simultanés : une érosion de surface (de type surverse) de son talus aval en même temps qu'une imbibition/saturation par la charge hydraulique appliquée du côté amont (avec écoulement interne entraînant une perte de cohésion du matériau). Ces deux processus peuvent être modélisés par l'avancement de deux fronts vers l'intérieur de la structure : front aval (vers l'amont) d'érosion et front amont (vers l'aval) de saturation (Fig. 5). C'est la rencontre de ces deux processus qui met en jeu une partie de la stabilité mécanique interne de la structure et génère la formation du conduit par débouillage/claquage hydraulique.

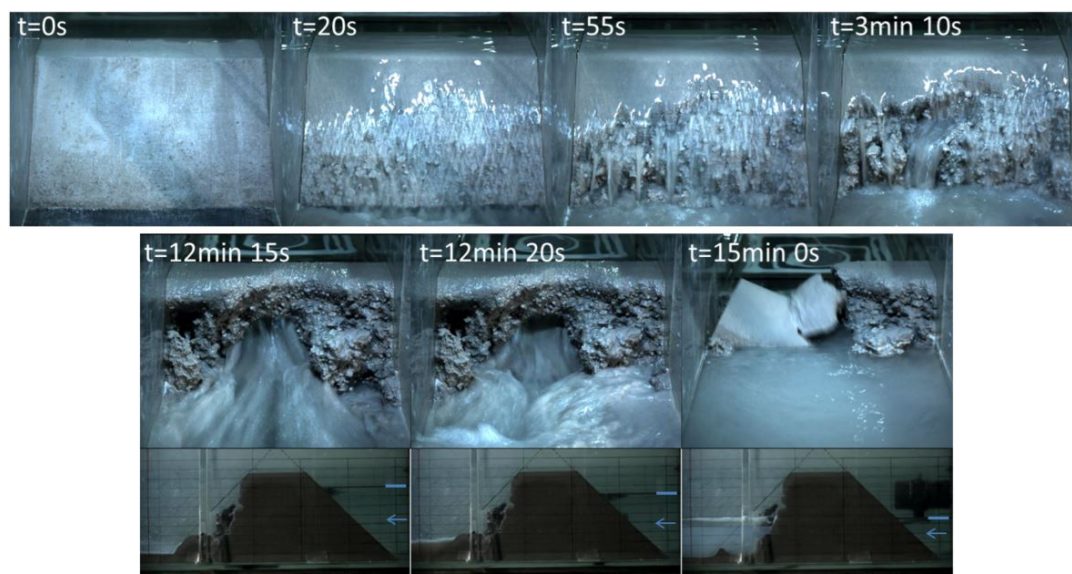


FIG. 4 – Surverse et érosion du talus aval ($t = 20$ s, 55 s et 3 min 10 s), formation brutale d'un conduit d'écoulement ($t = 12$ min 15 s et 12 min 20 s) avec décroissance rapide de la charge hydraulique amont (vues latérales) puis rupture finale du toit du conduit ($t = 15$ min 0 s) [102].

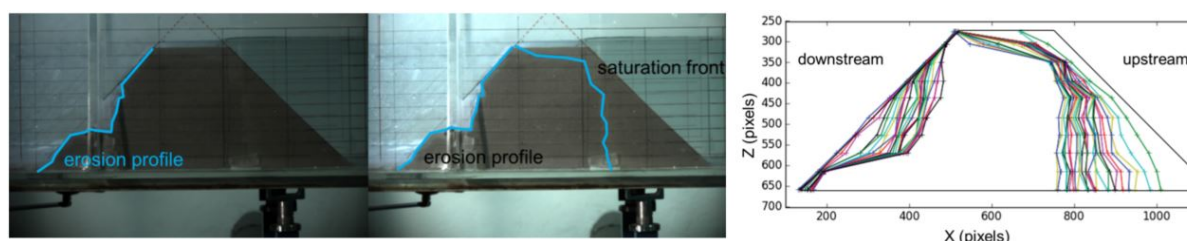


FIG. 5 – Analyse d'images de la vue latérale de la digue : profils d'érosion en aval et d'imbibition en amont ; profils successifs mesurés avec un pas de temps de 30 s [102].

Il convient, enfin, de souligner qu'une partie de mon travail s'intéresse aux essais d'érosion et que ces derniers peuvent, par exemple, tout aussi bien caractériser (avec certains croisements ou recouvrements) l'érosion interne de conduit (HET, section 1.2.1) ou de suffusion (conduite d'écoulement, section 2.3.2), l'érosion externe par jet(s) (MoJET, section 1.2.2) ou tangentielle immergée (WET et PumpET, section 3.2.1), la sensibilité à l'eau environnante (ACT, section 1.2.3).

Chapitre 1

Caractérisation des géomatériaux et des ouvrages en terre vis-à-vis des phénomènes d'érosion

1.1 Contexte, enjeux et démarche

Les ouvrages hydrauliques ou les ouvrages en terre comme les digues et remblais peuvent subir des agressions liées à l'eau qui, en période normale, sont prises en compte dans le dimensionnement et ne posent pas (ou ne devraient pas poser) de problèmes. Il en est tout autrement lorsque ces ouvrages sont soumis à des sollicitations majeures telles que les risques naturels représentés par les crues ou les inondations. Ces ouvrages peuvent être le siège d'écoulements interstitiels ou superficiels qui sont susceptibles de provoquer le détachement puis le transport de certaines particules constitutives de l'ouvrage ou de ses fondations par érosion interne ou surverse. Cette problématique est la principale cause des instabilités voire des ruptures d'ouvrages hydrauliques en terre [77, 83, 85]. Les enjeux sociétaux et économiques associés à cet aléa sont très élevés car, uniquement à l'échelle nationale, la France compte 8000 km de digues de protection contre les inondations, plus de 1000 km de digues d'aménagement hydraulique, de nombreux barrages en terre et 6700 km de voies navigables endiguées [113]. Ceci implique des besoins importants en termes de méthodologie de conception, construction, diagnostic, suivi et confortement des ouvrages [39, 63, 64], qui concernent les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'étude...

L'ensemble de ces besoins s'accompagne d'une nécessité de connaître de façon plus précise :

- le milieu « entourant » l'ouvrage et les mécanismes de sollicitation de l'ouvrage dans des conditions climatiques en forte évolution ;
- le comportement des matériaux et des ouvrages ;
- la durabilité des ouvrages et des techniques de confortement.

Les travaux présentés dans ce chapitre se rattachent à ces trois besoins avec un point d'attention particulier à la caractérisation des géomatériaux, sols ou sols traités par rapport aux phénomènes d'érosion. Ils ont été menés dans le cadre, ou en rapport, avec plusieurs projets : projets ANR et PN ERINOH, opération de recherche commune

Ifsttar-Cerema DOFEAS, collaboration de recherche Lhoist-Ifsttar-Irstea-EDF, Projet CPER et FEDER PACA Digue2020.

Le projet ANR et le projet national ERINOH « Erosion Interne des Ouvrages Hydrauliques » ont été menés de 2006 à 2013 par 32 partenaires (publics et privés) représentant des entreprises, des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre, des laboratoires de recherche et des bureaux d'études. Parmi les thèmes développés dans ces projets, les reconnaissances géophysiques [84] et les essais de laboratoire [47] ont pris une place toute particulière. Concernant les essais de laboratoire dédiés à l'étude de l'érosion interne, 17 dispositifs expérimentaux issus des travaux de 10 laboratoires ont ainsi été élaborés et/ou utilisés [47]. Dans ce cadre, j'ai notamment contribué au développement (dispositifs, moyens de mesures et protocoles d'essai), à la validation (partielle ou totale) ainsi qu'à la mise en œuvre de trois essais complémentaires.

L'opération de recherche DOFEAS « Dignes et Ouvrages Fluviaux : Erosion, Afouillements et Séismes » que j'ai co-animée avec mes collègues du Cerema, Edouard Durand et Damien Pham Van Bang, a mobilisé pendant 5 ans, de 2010 à 2014, les équipes de l'Ifsttar et du Cerema sur ces thématiques. Elle a permis de nombreux retours d'expérience et études de cas sur ouvrages, l'établissement de modes opératoires d'essais d'érosion et de dispersion, la mise au point d'outils (diagraphie de perméabilité et de mesure de l'anisotropie des sols), l'étude en laboratoire et sur ouvrages expérimentaux des matériaux traités à la chaux pour une application hydraulique (avec le groupe Lhoist)...

La collaboration de recherche Lhoist-Ifsttar-Cerema-Irstea-EDF a été menée entre 2010 et 2013. Elle a regroupé des acteurs publics et privés autour de la question nouvelle de l'utilisation des sols traités à la chaux pour une application aux ouvrages hydrauliques [96]. Elle s'est déclinée, pour l'Ifsttar notamment, dans des travaux d'abord au laboratoire (sur matériaux reconstitués) puis autour d'un ouvrage expérimental réalisé au Cerema/CER de Rouen [41]. J'ai contribué à l'ensemble de ces travaux tant scientifiquement qu'en terme de pilotage.

Le projet de recherche CPER-FEDER PACA Digue2020 a été conçu afin de permettre une meilleure maîtrise du risque de submersion marine par une approche pluridisciplinaire [75]. Ce projet a associé de 2017 à 2020, l'Irstea/Inrae (pilote), le Cerema, l'Ifsttar/Université Gustave Eiffel, l'UMR Espace et le Symadrem. Il s'est notamment réalisé autour de la conception, de la construction et de l'utilisation d'une plateforme de recherche constituée d'une digue en sol-chaux à proximité de Salin de Giroux (Arles). Dans ce cadre, j'ai coordonné les actions de l'Université Gustave Eiffel autour de la question de la durabilité des matériaux et de l'ouvrage. Cela a notamment été l'occasion de travaux conjoints entre géotechniciens (laboratoires GERS/SRO et GERS/CG) et géophysiciens (laboratoire GERS/GéoEND) dans une approche pluridisciplinaire et multi-échelle autour de la thèse de M. De Baecque [69]. Ces travaux ont également bénéficié d'un soutien de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques).

Dans le contexte de ces différents projets, j'ai notamment pu encadrer ou contribuer aux travaux de thèse de Tuan Long Pham [120], Iman Haghghi [87] et Margot De Baecque [69].

Dans ce chapitre, j'aborderai, dans un premier temps, les développements de plusieurs essais d'érosion en montrant et illustrant les nouveaux apports. Dans un second temps, nous verrons comment ces essais permettent de mieux comprendre et caractériser l'évolution des ouvrages et matériaux sensibles à l'érosion dans leur environnement

aux travers des travaux sur la résistance à l'érosion et la durabilité des matériaux en sol-chaux. Je conclurai sur un rapide bilan et les perspectives de la thématique.

1.2 Développement d'essais d'érosion

L'objectif principal des essais d'érosion est de mettre le sol dans une situation où il est conduit à être érodé ou dégradé selon différentes situations/configurations d'érosion [47] comme illustré aux figures 1.1 (érosion d'interface) et 1.2 (érosion de volume).

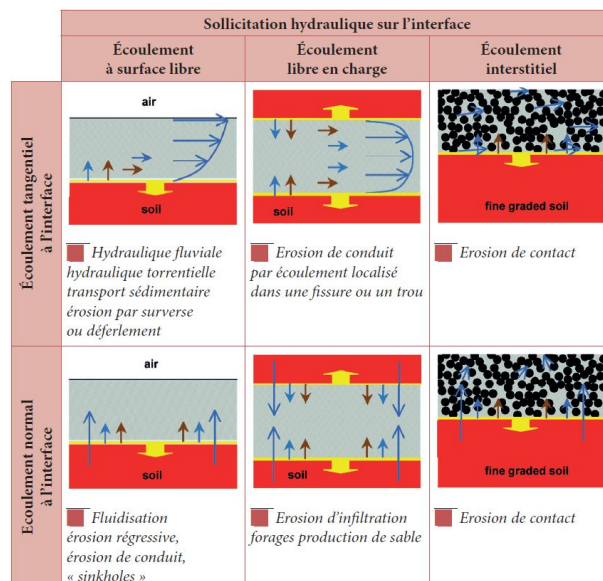


FIG. 1.1 – Classification des différents environnements hydromécaniques pour l'érosion d'interface : écoulement (bleu), trajet des particules (marron) et mouvement de l'interface (jaune) [47].

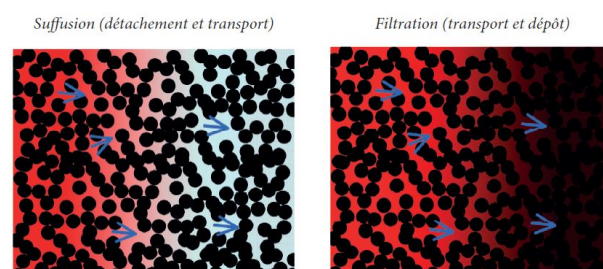


FIG. 1.2 – Phénomènes impliqués dans l'érosion de volume : suffusion et filtration [47].

Pour mieux caractériser la sensibilité à l'érosion en surface des sols (éventuellement traités), de nombreux essais existent : des essais par jet(s) fixe(s) ou mobile(s) [30, 90, 126] ; des essais d'érosion de surface en canal en charge [31, 133] ; des essais de suffusion en cellule triaxiale [17] ; des essais d'érosion de trou au travers d'un échantillon [15, 88, 147]...

Trois essais ont été en particulier développés ces dernières années au LCPC, à l'Isttar puis à l'Université Gustave Eiffel : essai d'érosion de trou (HET - "Hole Erosion Test"), essai d'érosion à Jets Mobiles (MoJET - "Mobile Jets Erosion Test") et essai de désagrégation (ACT - "Automated Crumb Test"). Ils permettent une caractérisation variée des phénomènes d'érosion comme illustré à la figure 1.3 et seront décrits dans cette section. Au delà de la simple présentation d'essais expérimentaux, les nouveautés apportées dans leur mise en œuvre, leur interprétation et/ou leur utilisation y seront détaillées. Nous discuterons, à la fin de cette section, de la possibilité de rapprocher les différents résultats de ces essais.

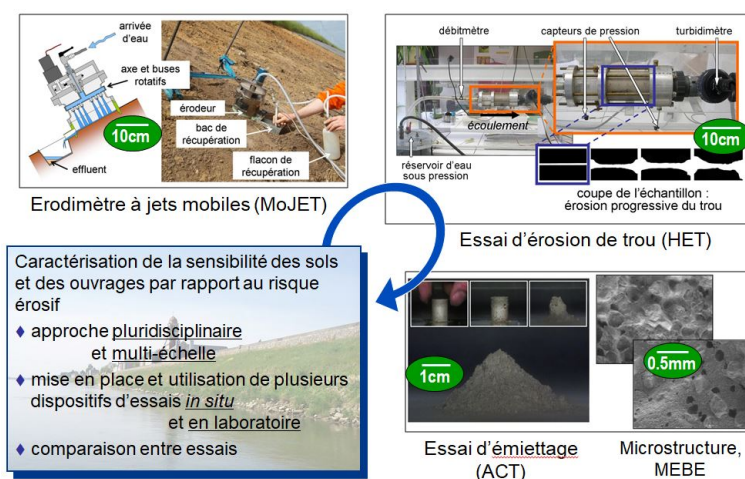


FIG. 1.3 – Différents essais de caractérisation de la sensibilité des sols à l'érosion.

1.2.1 Amélioration de l'essai d'érosion de trou - HET

L'essai d'érosion de trou ou HET (pour "Hole Erosion Test") est un essai inspiré de la norme ASTM D4647 du "pinhole test" [3, 134] et ayant connu de nombreux développements depuis le début des années 2000 [15, 21, 87, 88, 120, 146, 147].

Dispositif et protocole d'essai

Le dispositif d'essais d'érosion de trou est représenté à la figure 1.4. L'essai consiste à provoquer un écoulement d'eau au travers d'une éprouvette de sol d'une quinzaine de centimètres de long initialement percée d'un trou de quelques millimètres de diamètre (Fig. 1.4b). L'éprouvette de sol peut être constituée soit d'un sol intact, prélevé *in situ*, soit d'un sol remanié ou reconstitué puis compacté au laboratoire. Sous l'action d'un écoulement suffisamment important, la surface du trou va être érodée, les particules érodées transportées à l'extérieur du dispositif et le diamètre (moyen) du trou va donc augmenter au cours de l'essai. Une fois l'essai fini et l'éprouvette sortie du dispositif, un moulage final du trou à la cire (Fig. 1.4c) permet de connaître les propriétés géométriques finales du trou (dont le diamètre).

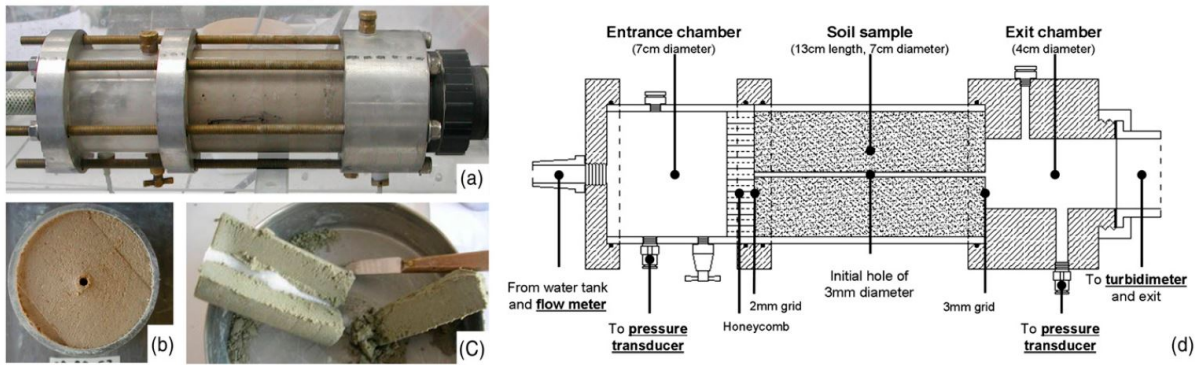


FIG. 1.4 – Dispositif d'essais HET : (a) photographie de la cellule d'érosion, (b) éprouvette de sol avant essai avec un trou de 3 mm de diamètre, (c) éprouvette de sol coupée après essai avec moulage en cire du trou, (d) schéma de la cellule d'érosion [88].

Interprétation des essais

Le but de l'interprétation d'un essai comme le HET est alors de déterminer la sensibilité des matériaux à l'érosion par des « courbes d'érosion » qui traduisent la relation entre les deux grandeurs physiques représentées sur la figure 1.5(a) dans le cas de l'érosion de trou :

- la contrainte de cisaillement τ que le liquide en écoulement applique sur l'interface (unité SI : Pa) ;
- le taux d'érosion $\dot{\varepsilon}$ qui représente la masse de sol sec érodé par unité de surface latérale du conduit et unité de temps (unité SI : $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

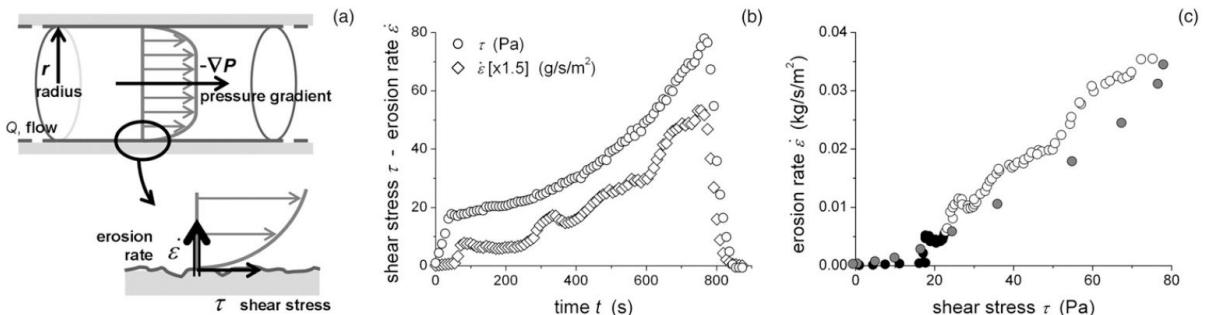


FIG. 1.5 – Essai d'érosion de trou HET : (a) schéma de l'interface, (b) signaux évalués, cisaillement τ et taux d'érosion $\dot{\varepsilon}$ en fonction du temps t , (c) courbe d'érosion $\tau - \dot{\varepsilon}$ pour un essai typique [88].

Les travaux menés ont permis des améliorations notables notamment au niveau de la maniabilité, de l'instrumentation, du protocole d'essai et de la méthode d'interprétation.

L'instrumentation a ainsi été améliorée en ajoutant des capteurs de pression précis et un turbidimètre (Fig. 1.4d). Cette instrumentation optimisée a alors permis de développer un nouveau modèle d'interprétation pour suivre de manière indépendante à toute loi d'écoulement le diamètre moyen du trou.

A partir des mesures au long de l'essai ($\Delta P(t)$ différence de pression entre entrée et sortie, $Q(t)$ débit au travers du trou; $T(t)$ signal de turbidité) et des paramètres de l'essai (L longueur de l'éprouvette, ρ_S densité sèche du sol, R_i rayon initial du trou, R_f rayon final mesuré du trou à l'aide du volume du moule en paraffine), il est ainsi possible d'évaluer l'évolution du rayon $r(t)$ du trou, la contrainte de cisaillement $\tau(t)$ et le taux d'érosion $\dot{\epsilon}(t)$ (Fig. 1.5b) pour en déduire la loi d'érosion ($\tau - \dot{\epsilon}$) (Fig. 1.5c). L'hypothèse essentielle, pour cela, est de considérer que, pour un sol donné, la turbidité T est proportionnelle à la concentration en sol de l'effluent C_{So} :

$$T = \alpha_{So} C_{So} , \quad (1.1)$$

où α_{So} est une constante pour un sol donné. La masse de sol érodée au cours de l'essai $m_{So_er}(t)$ se calcule alors par intégration :

$$m_{So_er}(t) = \frac{1}{\alpha_{So}} s_T(t) , \quad \text{avec} \quad s_T(t) = \int_0^t Q(u)T(u)du . \quad (1.2)$$

Dans ce modèle, la masse totale érodée est finalement évaluée par $M_{So_er} = \frac{1}{\alpha_{So}} S_T$ avec $S_T = \int_0^{t_f} Q(u)T(u)du$ où t_f est le temps final de l'essai.

Il est également possible de mesurer la masse totale érodée par $M_{So_er} = \rho_S \pi L (R_f^2 - R_i^2)$.

Étude paramétrique

Une étude paramétrique complète a été menée sur des mélanges d'argile kaolinite-sable de Fontainebleau (notés Kxx Sazz) et des mélanges d'argile kaolinite-limon-sable de Fontainebleau (notés Kxx Siyy Sazz) où xx yy et zz sont les fractions massiques des différents matériaux bruts. Les éprouvettes ont été préparés à une teneur en eau et une densité visées à l'OPN [88].

La turbidité d'une suspension notamment de sol (l'effluent de nos essais) est dépendante de nombreux paramètres : type et taille de particules, concentration... Dans une suspension, les particules les plus fines (qui sont également les plus nombreuses) sont assez largement les principales génératrices de signal de turbidité. Dans le cadre de l'étude paramétrique menée, il a donc été choisi de comparer les masses d'argile kaolinite érodée $M_{K_er} = f_K M_{So_er}$ (où f_K est la fraction massique d'argile) à la somme S_T . Les résultats sont représentés à la figure 1.6.

La comparaison sur des essais menés avec des paramètres variés (durée d'essais, surpression appliquée, composition des mélanges) est très bonne et montre la pertinence de la nouvelle approche proposée. Par ailleurs, comme présenté à la figure 1.7, les données caractéristiques de l'érosion $\tau - \dot{\epsilon}$ que nous pouvons en déduire, se placent sur une unique « courbe d'érosion ». De manière empirique, cette courbe d'érosion, classiquement admise (qui est même une hypothèse dans certains modèles d'interprétation) est une loi affine caractérisée par :

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= 0 && \text{pour } \tau \leq \tau_C , \\ \dot{\epsilon} &= k_{er}(\tau - \tau_C) && \text{pour } \tau > \tau_C , \end{aligned} \quad (1.3)$$

où les paramètres sont :

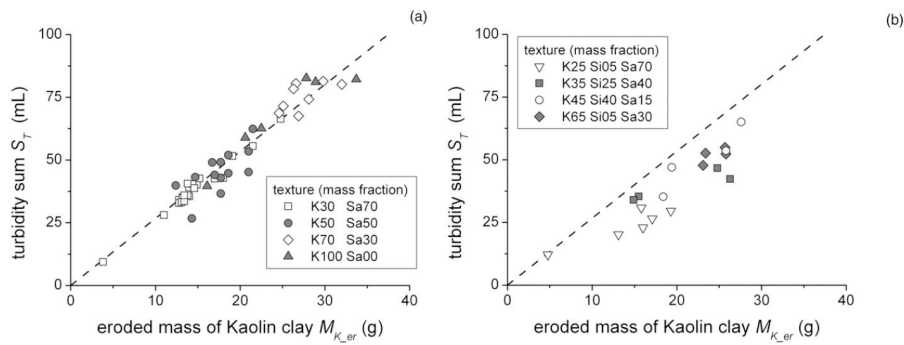


FIG. 1.6 – Somme finale de turbidité S_T en fonction de la masse totale d'argile kaolinique érodée M_{K_er} (différentes surpressions ΔP appliquées et essais de répétabilité) pour : (a) les mélanges argile kaolinite-sable, (b) les mélanges argile kaolinite-limon-sable [88].

- τ_C (Pa), la contrainte de cisaillement critique ou contrainte seuil qui représente la contrainte nécessaire à l'initiation de l'érosion, i.e. en dessous de cette contrainte le fluide n'exerce pas une sollicitation suffisante pour qu'il y ait érosion ;
- k_{er} ($s \cdot m^{-1}$), le coefficient d'érosion du sol qui traduit l'augmentation du taux d'arrachement des particules de sol lorsque la contrainte augmente.

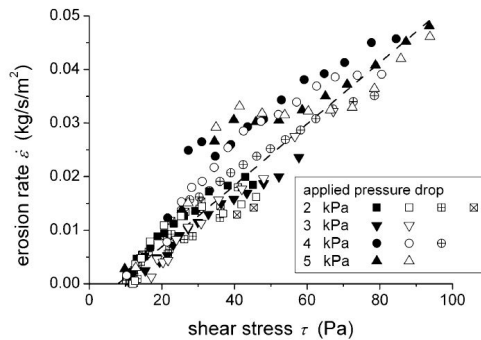


FIG. 1.7 – Courbes d'érosion $\tau - \dot{\epsilon}$ pour un mélange donné (argile kaolinite-sable à 50% de fraction massique en argile) : différentes surpressions ΔP appliquées et essais de répétabilité [88].

Au final, les données expérimentales de l'ensemble de l'étude paramétrique sont présentées à la figure 1.8. Pour les différents mélanges testés, les données obtenues se placent toutes sur des courbes d'érosion de la forme (1.3).

Ces résultats illustrent la pertinence de la nouvelle méthode proposée (protocole d'essai et interprétation), car les résultats sont discernables et nous pouvons ainsi comparer les propriétés du sol aux courbes d'érosion : l'utilisation (et l'interprétation) du signal de turbidité représente une amélioration significative pour l'estimation en temps réel des dimensions instantanées du trou et de la masse de sol érodée. Cette approche physique est basée sur la concentration de particules dans l'écoulement comme une indication du sol érodé et n'emploie donc pas d'hypothèses hydrauliques sur l'écoulement ce qui est un avantage en raison d'un régime d'écoulement transitoire et de la rugosité relative du trou qui évolue pendant l'essai.

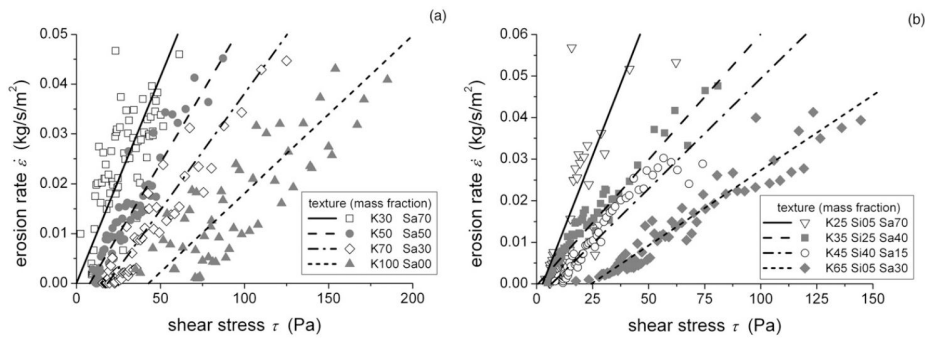


FIG. 1.8 – Courbes d'érosion $\tau - \dot{\epsilon}$ données expérimentales (différentes surpressions ΔP appliquées et essais de répétabilité) et ajustement linéaire pour : (a) les mélanges argile kaolinite-sable, (b) les mélanges argile kaolinite-limon-sable [88].

1.2.2 Amélioration de l'érodimètre à jets mobiles - MoJET

Les essais d'érosion en laboratoire sont un moyen pertinent de comprendre comment divers facteurs affectent le processus complexe de l'érosion des sols. Ils permettent, notamment comme pour le HET, d'avoir des situations bien contrôlées d'écoulement, de sollicitation des éprouvettes et de mesures des paramètres d'érosion.

Cependant, les essais qui peuvent être réalisés sur le terrain sont également d'un grand intérêt car ils permettent de tester le sol dans son état naturel avec la possibilité de pratiquer l'essai à proximité de zones d'intérêt : brèche, structures fusibles... C'est notamment le cas des essais d'érosion par jet comme développés par Hanson pour le JET "Jet Erosion Test" [90, 91] et par Hénensal et Duchatel pour l'érodimètre à jets mobiles [94, 95].

Dispositif et protocole d'essai

L'érodimètre MoJET (pour "Mobile Jets Erosion Test") est constitué :

- d'une partie mécanique active, appelée érodeur, initialement élaborée par Hénensal et Duchatel [95] (Fig. 1.9b) ;
- d'un dispositif d'alimentation en eau à débit contrôlé et de différents organes de service (Fig. 1.9a).

Comme représenté à la figure 1.10(a), le fluide utilisé transite par la partie supérieure de l'érodeur pour sortir par six buses ou gicleurs. Ces derniers, qui ont un diamètre de 0,5 mm, sont portés par un bras mobile, en rotation à vitesse constante. Cette rotation s'effectue dans une chambre circulaire de diamètre 15,2 cm appelée chambre d'érosion. L'ensemble est déposé sur une trousse coupante équipée d'un bac récupérateur pour être utilisé pendant l'essai. Lors de l'essai, l'érodeur projette six jets d'eau de caractéristiques semblables et perpendiculairement au sol ou à l'échantillon de sol dont on veut mesurer la sensibilité à l'érosion. Le sol n'est pas totalement submergé. Il s'agit d'un essai non destructif et peu invasif pour la surface testée. Les figures 1.10(b,c) illustrent l'état de la surface du sol avant et après essai.

A partir du dispositif conçu par Hénensal et Duchatel [94, 95], les travaux menés ont porté sur l'adaptation du dispositif d'essai (ajout d'un réservoir d'eau, d'une pompe et d'un débitmètre) ainsi que du protocole d'essai pour rendre l'essai adapté aux mesures

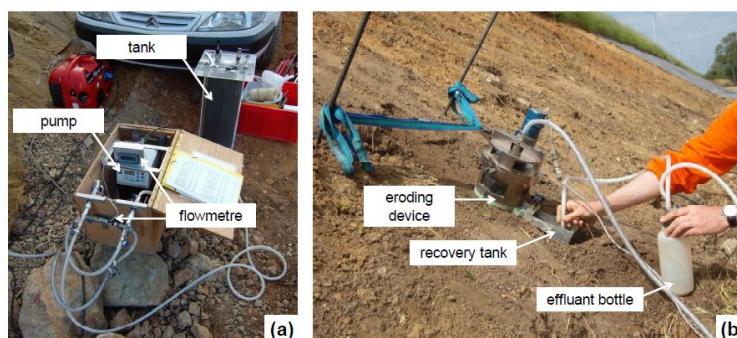


FIG. 1.9 – Essai d'érodimètre à Jets Mobiles MoJET : (a) dispositif et réservoir d'eau, (b) érodeur et système de recueil des effluents [126].

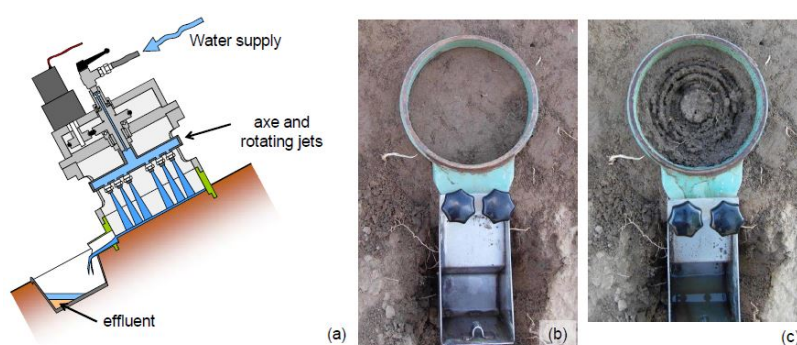


FIG. 1.10 – Essai d'érodimètre à Jets Mobiles MoJET : (a) schéma de l'érodeur, (b) photos du sol testé avant et après essai [126].

sur des ouvrages hydrauliques variés sur le terrain ainsi que sur des échantillons prélevés et/ou confectionnés au laboratoire. L'essai consiste alors à solliciter la surface à tester avec un certain débit d'eau injecté pendant un temps donné avec recueil des effluents au cours du temps. Selon la nature des sols à tester, un débit de 600 à $1500 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ pendant une durée de 5 à 12 min est appliqué. L'angle entre l'érodeur (ou la surface du sol) et l'horizontale est également un paramètre considéré.

Étude terrain

A titre d'illustration, les résultats d'une campagne d'essais sur la réhausse fusible du déversoir de Montlivault (41) sont présentés [87, 126]. Ce déversoir, construit entre 1887 et 1890, permet de limiter la côte du niveau et le débit de pointe de la Loire en cas d'événement extrême de crue. Il est équipé d'une réhausse en terre d'environ 1 m, dite « fusible » qui, au cours du temps s'est recouverte d'un tapis végétal. Les matériaux ont donc évolués depuis leur mise en place. Les essais menés ont eu pour but de caractériser la sensibilité à l'érosion du terrain constituant la réhausse en terre du déversoir. Ces essais devaient plus particulièrement permettre de détecter si cette sensibilité présente des variations selon la profondeur et selon l'état hydrique du sol.

La figure 1.11 présente le positionnement des essais menés : selon 4 profils (P3, P4, P5 et P6), à différentes profondeurs (de la surface à 40 cm) et avec 2 essais de répétabilité (notés R1 et R2) à une distance d'1 m.

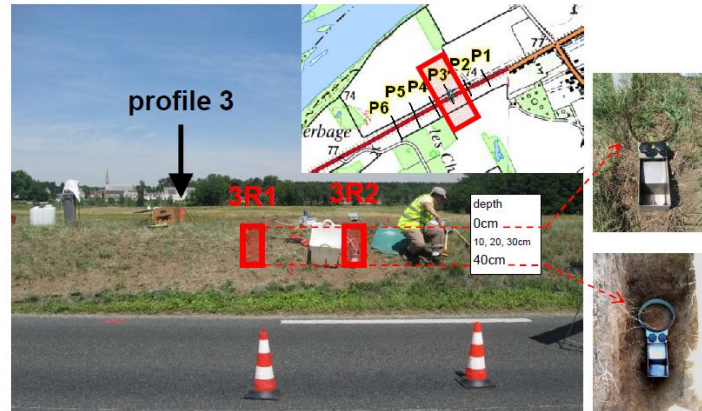


FIG. 1.11 – *Positionnement des essais pour l'étude de la sensibilité à l'érosion de la réhausse fusible du déversoir de Montlivault [126].*

Lors de ces essais, le sol a été soumis à l'action des jets avec les paramètres suivant :
 — débit d'eau constant d'environ $600 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;
 — durée de l'essai de 12 minutes avec recueils intermédiaires des effluents chargés à 1, 2, 4, 6, 8, 10 et 12 minutes.

De retour dans les locaux, l'effluent est passé à l'étuve pour déterminer la masse sèche de matériau érodé par l'érodimètre. Cette charge solide sert à caractériser l'érosion, la masse totale érodée étant mesurée au cours du temps. Une autre courbe caractéristique est obtenue en considérant le taux d'érosion moyen, c'est à dire en divisant la masse sèche érodée à chaque intervalle de temps par la durée de ce dernier. Ces courbes caractéristiques sont représentées à la figure 1.12 pour les essais effectués à 4 profondeurs au voisinage du profil P3.

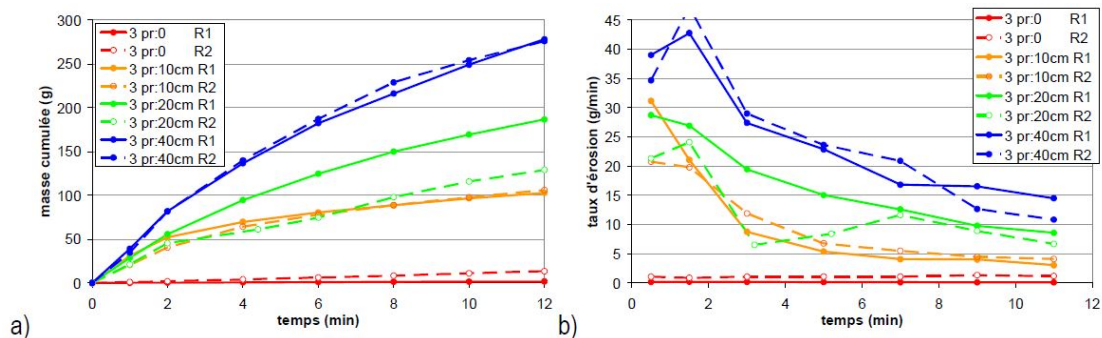


FIG. 1.12 – *Résultats des essais sur les profils P3R1 et P3R2 : (a) masse érodée cumulée, (b) taux moyen d'érosion en fonction du temps [126].*

Une bonne discernabilité entre les essais de répétabilité est observée : les courbes relatives à chaque essai se regroupent principalement selon la profondeur d'essai. Il est

à noter que les deux essais effectués sur la surface de la réhausse (profondeur 0 cm, Fig. 1.12) qui est entièrement végétalisée, présentent une grande résistance à l'érosion superficielle par rapport à l'ensemble des essais effectués en profondeur. Il est également observé que le sol en profondeur est clairement le plus sensible à l'érosion : il présente à la fois l'érosion totale la plus importante et le taux d'érosion qui reste le plus élevé au fil du temps, notamment en fin d'essai.

La figure 1.13 présente la masse totale érodée durant les 12 minutes d'essai en fonction de la profondeur d'essai pour l'ensemble des essais effectués. Elle confirme une plus forte résistance à l'érosion près de la surface. Cette résistance décroît clairement en profondeur avec une augmentation de la masse érodée.

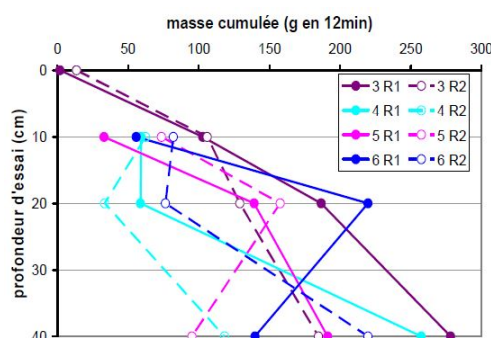


FIG. 1.13 – Évolution de la masse totale érodée en fonction de la profondeur d'essai sur l'ensemble des profils d'essais [126].

Dans le cadre de l'étude sur la réhausse fusible du déversoir de Montlivault, des essais complémentaires de caractérisations des sols ont également été effectués : teneur en eau, granulométrie... Sur l'ensemble des profils testés, il a été mis en évidence que le matériau devient plus sensible à l'érosion en descendant en profondeur malgré une teneur en matière fine ($< 80 \mu\text{m}$) qui augmente. Cette observation est contradictoire avec la constatation usuelle qu'un sol plus fin est généralement moins sensible à l'érosion. Une explication formulée mais non testée, a porté sur l'influence de la végétation et de la matière organique sur la stabilisation des sols en surface.

Ces résultats viennent illustrer l'utilisation de l'érodimètre MoJET sur site. Au cours de nombreuses études, au laboratoire et sur sites [48, 50, 70, 96, 126], il s'est révélé être un outil adapté, simple et robuste, pour la caractérisation de la sensibilité à l'érosion des sols. Même s'il ne délivre pas de lois d'érosion aussi bien établies que pour le HET, par exemple, le MoJET est un essai pertinent et complémentaire des autres essais par sa capacité d'adaptation en particulier sur le terrain.

1.2.3 Développement de l'essai d'émiettage automatisé - ACT

L'essai d'émiettage ou "Crumb Test" est un essai pour mesurer la dispersion du sol. Il a été développé successivement par Emerson en 1964 [74] pour caractériser la cohésion des agrégats puis par Sherard *et al.* en 1976 [134] avant de faire l'objet d'une normalisation par l'ASTM sous le numéro D6572 [4]. Le "Crumb test" est un essai simple mais qualitatif qui consiste à immerger un cube de sol remanié de petite taille (environ 15 mm de côté) dans un volume d'eau distillée beaucoup plus important pour observer la tendance des

particules du sol à se disperser en suspension colloïdale. S'il donne une bonne et rapide indication sur la sensibilité à la dispersion de l'argile, l'essai reste cependant qualitatif car les résultats dépendent en effet de la couleur de l'argile, de la lumière dans le laboratoire mais aussi de l'opérateur...

Dispositif et protocole d'essai

Dans l'objectif de proposer un nouvel essai, les travaux menés ont permis des développements importants à tous les niveaux :

- dispositif expérimental, avec un suivi non intrusif par caméras ;
- préparation des essais, avec un contrôle des modalités de confection des éprouvettes ;
- protocole d'essai, pour être le plus indépendant possible de tout opérateur ;
- interprétation, automatisée.

Comme illustré à la figure 1.14, l'essai d'émiettement automatisé (ACT - "Automated Crumb Test") utilise deux caméras qui permettent de suivre l'évolution temporelle de la géométrie d'un échantillon cylindrique de sol. L'échantillon est placé dans un récipient en plastique transparent rempli d'eau distillée (ou d'eau environnante à tester).

L'essai reste donc relativement simple à mettre en œuvre et permet d'étudier de nombreuses textures de sols ainsi que de fluides environnants. La quantité de liquide nécessaire à l'essai est en effet bien inférieure aux autres essais d'érosion, ce qui permet de faire varier facilement les propriétés physico-chimiques du fluide environnant (typiquement le pH ou la charge ionique de l'eau).

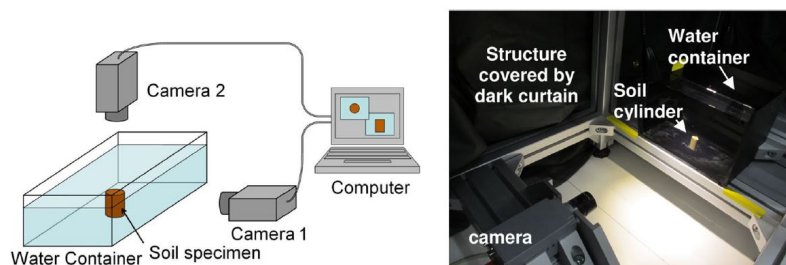


FIG. 1.14 – Schéma et photographie du dispositif d'essais ACT [89].

La préparation des éprouvettes d'essais (cylindres de 15 mm de diamètre et 20 mm de hauteur) a fait l'objet d'une attention particulière avec le développement de matériels spécifiques, comme présenté à la figure 1.15.

Une fois confectionnée, l'éprouvette est délicatement placée dans le réservoir rempli de liquide approprié (eau distillée ou fluide environnant spécifique) et l'acquisition des images est lancée.

Pour la plupart des échantillons testés, plusieurs phases se succèdent lors de l'essai (Fig. 1.16a) :

- A. Tout d'abord, une phase d'hydratation de l'échantillon remarquable par son « gonflement » se produit, alors que la forme géométrique globale reste inchangée.
- B. Il y a ensuite de premiers décollements : des particules de sols, rassemblées en fines pellicules, tombent de la paroi latérale de l'échantillon et commencent à former un petit tas au pied de l'échantillon, qui conserve toujours sa forme.

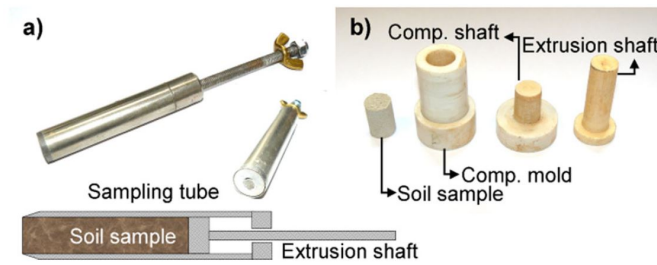


FIG. 1.15 – Dispositifs de préparation des éprouvettes : (a) mini trousse coupante pour prélèvement de sols, (b) moule cylindrique de compactage pour les sols reconstitués [89].

C. Une chute d'amas de sol plus conséquents provenant de la partie supérieure de l'échantillon se produit ensuite, on parlera alors d'« affaissement » dans la mesure où la hauteur de l'échantillon diminue.

Sur la plupart des échantillons, au bout d'un temps « long » (de quelques minutes à plusieurs heures), une structure finale en forme de cône est atteinte. Certains échantillons peu sensibles (notamment les sols traités) peuvent cependant ne pas présenter cette dernière phase C et rester majoritairement « intacts ».

Interprétation des essais et étude paramétrique

Tous les essais sont réalisés avec la même configuration du dispositif d'essai et des caméras. Un traitement numérique permet d'extraire le profil de l'échantillon à partir de chaque image (Fig. 1.16b). Par la suite, il est possible d'étudier, en fonction du temps t depuis le début de l'essai, plusieurs paramètres comme illustré sur la figure 1.16(c) :

- la hauteur H , moyenne de la hauteur sur deux millimètres de largeur au centre ;
- le diamètre typique D , sur une bande de 2 mm de hauteur à 15 mm du fond ;
- le volume V estimé à partir de l'hypothèse d'un solide de révolution par intégration de la surface de coupe par rotation autour de l'axe central. Cette hypothèse peut être vérifiée par la symétrie du profil de l'échantillon.

La répétabilité et les observations menées sur différents essais permettent de valider le dispositif et le protocole d'essai.

À titre illustratif, des courbes d'essais typiques sont données à la figure 1.17 dans le cadre d'une étude paramétrique portant sur des mélanges d'argile kaolinite-sable de Fontainebleau (notés $KxxSzz$ où xx et zz sont les fractions massiques des différents matériaux bruts) préparés à différente teneur en eau w et compactés avec la même force de compactage statique (500 N).

Différents paramètres permettent d'avoir une bonne caractérisation de ces courbes. Il s'agit notamment, pour la phase d'hydratation, de l'amplitude de gonflement ΔH_{max} et du temps de gonflement T_{Swell} . Ils sont représentés à la figure 1.18 pour l'ensemble des essais menés sur les différents mélanges.

Dans le but de caractériser plus finement et de comparer la phase d'hydratation sur différents essais, les courbes ΔD et ΔH ont été ajustées pour l'étape de gonflement. Le meilleur ajustement à deux paramètres correspond à une loi de puissance du type :

$$\Delta X = A_X T^{B_X} , \quad (1.4)$$

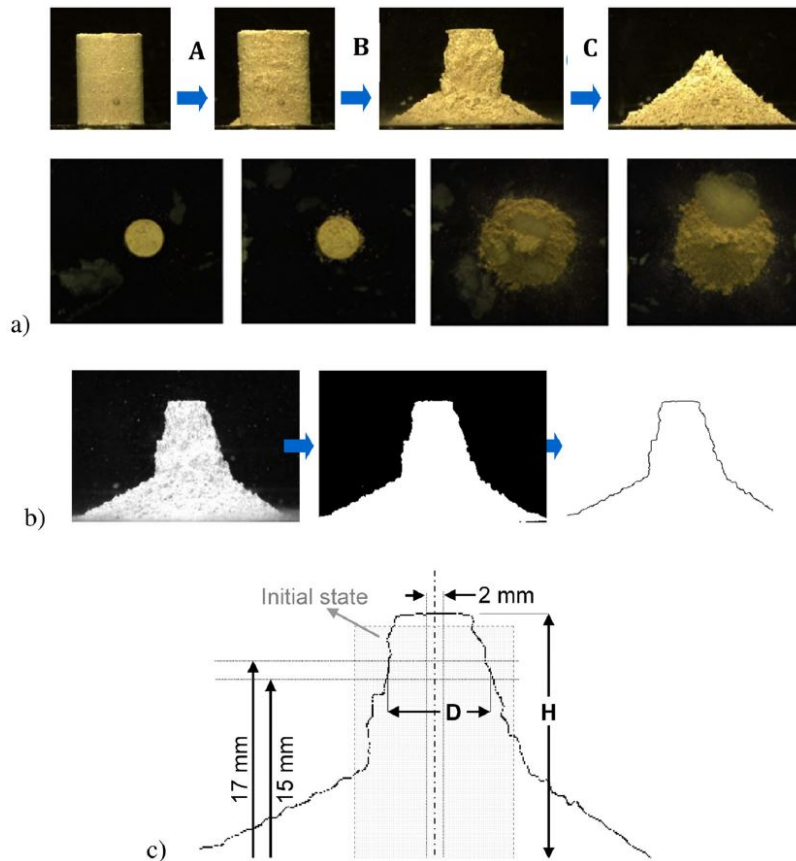


FIG. 1.16 – Essai d'émiettement automatisé ACT typique : (a) comportement général de l'échantillon vue par les 2 caméras, (b) traitement des images, (c) définition des paramètres géométriques [89].

où X correspond à la hauteur (H) ou au diamètre (D) de l'échantillon et A_X et B_X sont les paramètres ajustables. La loi de puissance ajustée est représentée par une droite rouge en échelle log-log sur les figures 1.17(d) et 1.17(e).

Une synthèse de cette analyse est proposée à la figure 1.19 pour l'ensemble des essais menés sur les différents mélanges argile kaolinite-sable de Fontainebleau (fraction argileuse et teneur en eau). Elle permet notamment de décrire les processus d'infiltration lors de la phase d'hydratation.

Pour l'ensemble des essais, les coefficients de la loi de puissance B_D et B_H (Fig. 1.19) ont été trouvés presque constants avec des valeurs autour de $\langle B_H \rangle = 0,43$ et $\langle B_D \rangle = 0,61$. Les résultats sur les diamètres D sont plus dispersés que sur les hauteurs H du front de détachement de particules tôt après le début de l'essai.

Les valeurs B_D et B_H ont été trouvées autour de la valeur 0,5 en accord avec la forme simple de la fonction d'infiltration donnée par Philip en 1957 [121]. Au début de l'infiltration, la capillarité domine l'écoulement tandis que la contribution de la gravité peut être négligée. L'infiltration cumulative en fonction du temps peut alors être exprimée sous la forme :

$$\Delta I = ST^{0,5}, \quad (1.5)$$

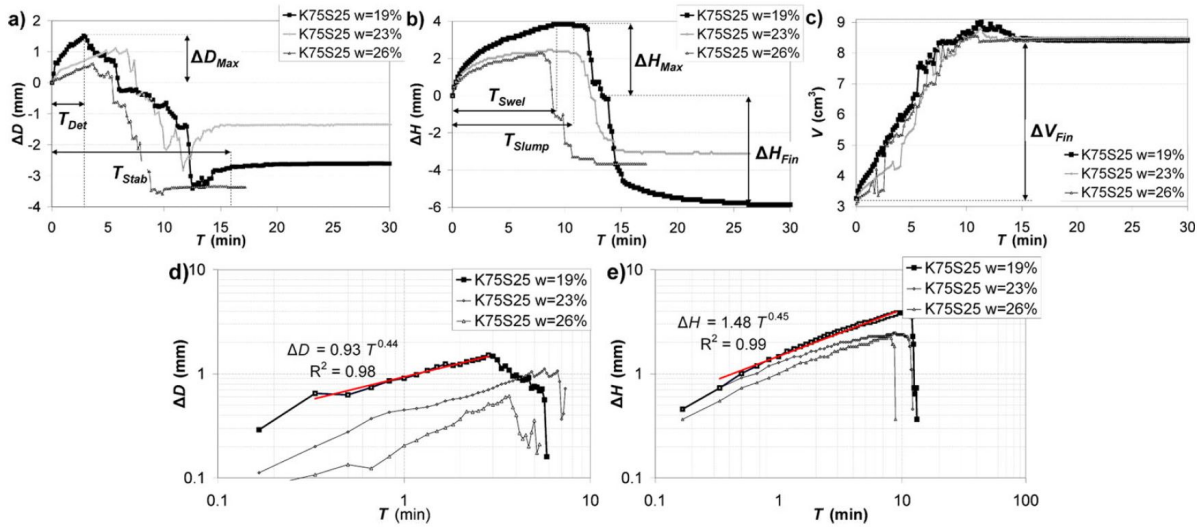


FIG. 1.17 – Évolution des différents paramètres pour des mélanges d'argile kaolinite et sable (K75S25) et définition des grandeurs caractéristiques ($\Delta X(T) = X(T) - X(T = 0)$) : (a) ΔD , (b) ΔH , (c) ΔV , (d) ΔD (échelle log-log), (e) ΔH (échelle log-log) [89].

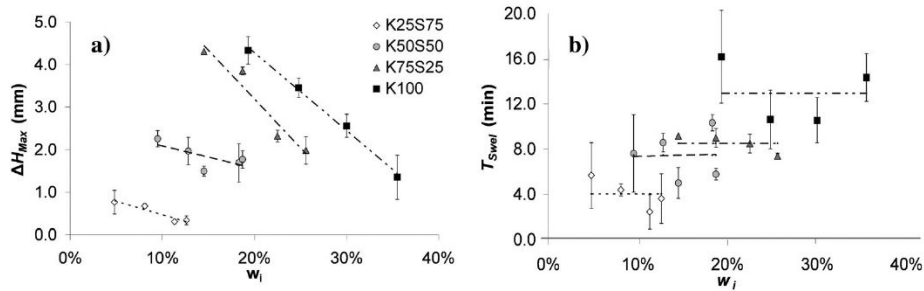


FIG. 1.18 – Caractérisation verticale de la phase de gonflement pour les mélanges d'argile kaolinite et sable à différentes teneurs en eau : (a) amplitude de gonflement ΔH_{max} , (b) temps de gonflement T_{Swell} [89].

où I (mm) est la profondeur d'infiltration cumulée à une hauteur hydraulique donnée, T (min) le temps d'infiltration et S ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-0.5}$) la sorptivité du milieu définie comme une mesure de la capacité du milieu à absorber ou désorber un liquide par capillarité.

En traçant I au début de l'infiltration en fonction de $T^{0,5}$ et en identifiant la partie du graphique ayant un comportement linéaire, on peut estimer le facteur S à partir de la pente de la ligne droite ajustée. En considérant maintenant que le gonflement de l'échantillon est causé par l'hydratation du sol, l'amplitude du gonflement devrait avoir une relation proportionnelle directe avec la longueur d'infiltration. Ainsi, par analogie, les paramètres A_H et A_D en fonction du temps (Fig. 1.19), similaires à la sorptivité S , pourraient être calculés pour le gonflement tandis que les paramètres B_H et B_D seraient fixés à 0,5. A_H et A_D peuvent ainsi être utilisés pour comparer la tendance au gonflement pour différentes textures de sol.

Ces résultats illustrent comment le nouvel essai développé permet de caractériser et de discriminer les différents comportements de sol par rapport aux interactions hydriques.

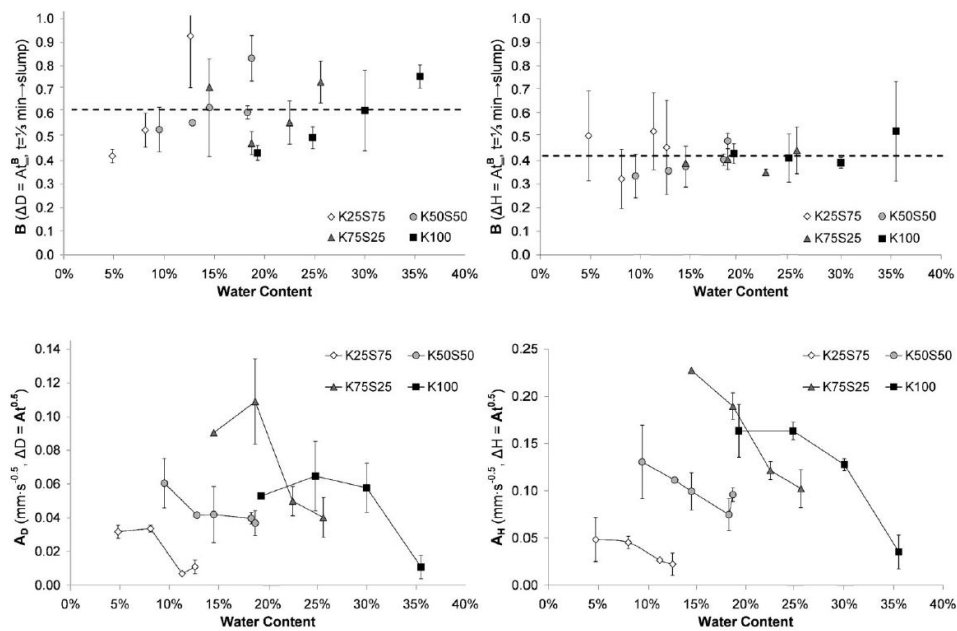


FIG. 1.19 – Caractérisation verticale de la phase de gonflement : coefficients des lois de puissance B_D et B_H et préfacteurs multiplicatifs A_D et A_H [89].

L'un des avantages de l'ACT est sa rapidité et sa polyvalence. Il est ainsi possible de réaliser un grand nombre d'essai en faisant varier les propriétés des textures testées mais également (non illustré ici) le fluide environnant.

1.2.4 Rapprochement et comparaison des essais

Pratiquer différents essais d'érosion pose naturellement la question de leur comparaison. Cette comparaison est un sujet d'intérêt pour l'ensemble de la communauté scientifique qui travaille autour de cette thématique [47, 49, 89, 109] pour, au moins, deux raisons :

- l'étude croisée des essais (et de leur résultats) entre eux, de sorte à comparer les modes opératoires et les modèles d'interprétation pour des essais proches (typiquement HET et EFA "Erosion Function Apparatus") ou à rapprocher les essais caractérisant des phénomènes sensiblement différents (par exemple HET et essai de suffusion), notamment pour approfondir notre connaissance des mécanismes sous-jacents ;
- la caractérisation avec des essais plus simples et/ou plus rapides et/ou robustes d'une « sensibilité à l'érosion » de sorte à pouvoir mener plus efficacement des études paramétrique ou des essais sur le terrain.

Dans le but de rapprocher les essais entre eux, plusieurs démarches ont pu être proposées : comparaison de lois d'érosion [47], bilan énergétique [109]. . . Dans le cadre du projet ERINOH [47], quatre sables argileux avec deux types d'argile (kaolinite Proclay ou Illite) ainsi que du limon d'Orly ont été testés à l'aide de deux essais d'érosion de trou HET [15, 88], d'un essai d'érosion de contact CET pour "Contact Erosion Test" [8], d'un essai de suffusion SFET pour "Suffusion Filtration Erosion Test" [16] et d'un essai

EFA pour "Erosion Function Apparatus" [31]. Différentes hypothèses sur les modèles d'interprétation ont permis d'arriver à des comparaisons reposant sur une formulation en loi d'érosion (1.3) : $\dot{e} = k_{er}(\tau - \tau_C)$ pour $\tau > \tau_C$. La figure 1.20 présente les résultats de cette comparaison en précisant les valeurs de la contrainte seuil d'érosion τ_C et du coefficient d'érosion k_{er} pour les différents sols étudiés.

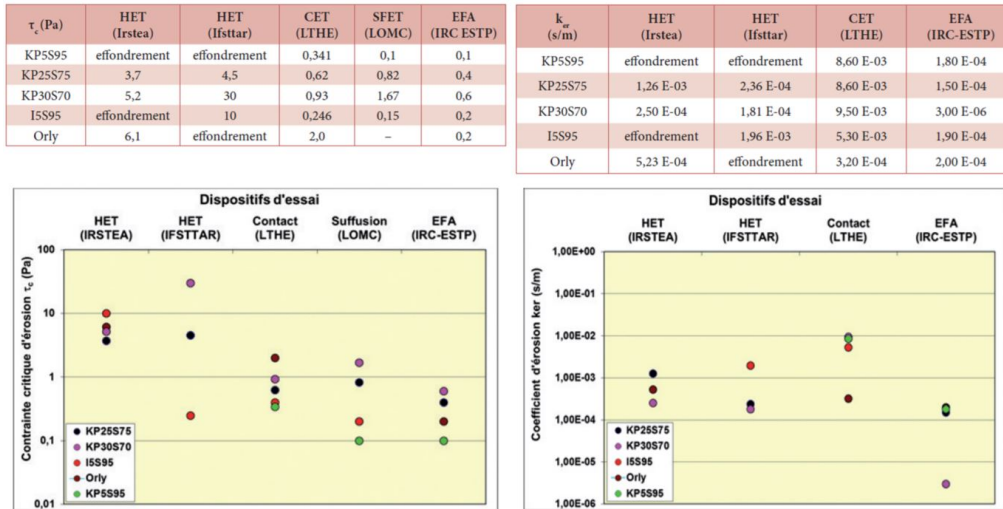


FIG. 1.20 – Comparaison d'essais d'érosion : valeurs de la contrainte seuil d'érosion et du coefficient d'érosion de plusieurs sols selon différents dispositifs [47].

Il ressort de cette étude que les paramètres des lois d'érosion sont très variables, selon les essais, pour des sols « identiques » (à nuancer toutefois car avec les modes de préparation et compaction sont adaptés à chaque essai) : valeurs (très) différentes et classement relatif qui diffère selon les essais. Cela met en évidence la forte influence des procédures expérimentales sur la détermination de la sensibilité des sols à l'érosion.

Dans une autre étude [89], une tentative de comparaison entre résultats d'essai d'érosion de trou HET et d'essai d'émiettement automatisé ACT a été effectuée sur des mélanges agile kaolinite-sable de Fontainebleau préparés à la teneur en eau optimale. Les résultats sont présentés à la figure 1.21. Cette comparaison repose sur l'analyse phénoménologique des deux essais et le rapprochement de paramètres obtenus.

Deux rapprochements ont ainsi été effectués :

- Pour le HET, la contrainte de cisaillement critique τ_C est la contrainte de cisaillement à laquelle l'érosion est (macroscopiquement) initiée (voir Eq. 1.3 et Fig. 1.7). Elle est ainsi rapprochée, pour l'ACT, de la hauteur maximale de gonflement ΔH_{Max} illustrée à la figure 1.17(b) et où s'initie la désagrégation. Comme présenté à la figure 1.21(a), la contrainte de cisaillement critique τ_C et la hauteur ΔH_{Max} suivent des tendances similaires, sauf pour les fractions les plus élevées en argile ;
- Pour le HET, le coefficient d'érosion k_{er} correspond à l'accroissement du taux d'érosion avec la contrainte de cisaillement (voir Eq. 1.3 et Fig. 1.7). Il est ainsi rapproché, pour l'ACT, de l'inverse du temps de détachement T_{Det} illustré à la figure 1.17(a). Comme présenté à la figure 1.21(b), plus le temps est long avant qu'un spécimen de sol commence à se désagréger dans l'eau, plus le taux d'érosion

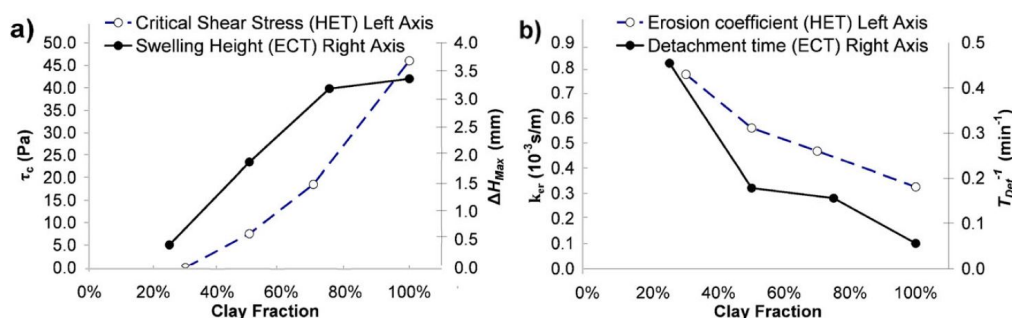


FIG. 1.21 – Comparaison des essais HET et ACT : (a) contrainte de cisaillement critique τ_c et gonflement vertical maximum ΔH_{max} , (b) coefficient d'érosion k_{er} et inverse du temps de détachement T_{Det} [89].

est faible pour une contrainte de cisaillement donnée. Cela pourrait signifier que la texture du sol est plus résistante à l'érosion.

Ces rapprochements peuvent constituer une avancée notable dans le cadre des diagnostics réalisés sur les ouvrages en terre car les essais de type dispersif ou de désagrégation sont généralement plus simples à mettre en œuvre que les essais d'érosion de trou.

A travers ces deux illustrations, il en ressort qu'il n'est pas encore possible d'établir des relations suffisamment fortes entre les différents types/essais d'érosion. Dans les études et travaux de recherche menés (notamment ceux proposés à la section suivante), il convient donc de considérer les différents essais existants comme complémentaires.

1.3 Résistance à l'érosion et durabilité des matériaux sols-chaux

Le traitement des sols fins trop humides à la chaux est une technique de valorisation des matériaux éprouvée et reconnue dans le domaine du terrassement. Il permet ainsi d'obtenir pour des sols limoneux ou argileux une meilleure maniabilité au moment de la mise en place et des caractéristiques mécaniques bien supérieures par rapport à leur état naturel. Cependant, son application dans le domaine des ouvrages hydrauliques reste marginale notamment en Europe du fait de la méconnaissance du comportement au long terme du matériau « sol-chaux » dans ce type d'ouvrage. C'est pourtant un sujet d'intérêt car l'utilisation, en place, de matériaux permet d'éviter les coûts (économiques et environnementaux) de transport de matériaux de meilleure qualité [96].

L'application des essais d'érosion présentés à la section précédente à ces matériaux permet d'évaluer l'intérêt du traitement à la chaux pour renforcer leur résistance à l'érosion. Les travaux menés autour de cette question se sont fait en 2 grandes étapes : caractérisation de la sensibilité à l'érosion des sols traités puis étude de la durabilité dans le contexte particulier des ouvrages à la mer. Dans chacune de ces 2 étapes, la démarche proposée a été la même : étude au laboratoire puis essais et suivi d'ouvrages pilotes.

1.3.1 Etude comparative de la résistance à l'érosion des sols traité à la chaux

Pour répondre à la question émergente de la sensibilité à l'érosion des sols traités à la chaux, les travaux de caractérisation se sont déroulés en deux temps. Dans un premier temps, des études expérimentales ont été effectuées au laboratoire sur des sols naturels en état non traité ou traité sur des éprouvettes reconstituées selon des procédures générales dont les paramètres sont bien maîtrisés [48, 87]. Ensuite, les études ont été poursuivies au travers d'essais *in situ* et sur des éprouvettes prélevées sur deux ouvrages pilotes réalisés au Centre d'Expérimentations et de Recherches (CER) de Rouen [41, 50].

Essais au laboratoire

Les essais en laboratoire ont été effectués sur les éprouvettes confectionnées à partir de deux sols, limoneux et argileux, d'Héricourt (Haute-Saône, France). Les éprouvettes de sols non traités ont été humidifiées à leur teneur en eau optimale selon l'essai Proctor standard et compactées à 95% de leur masse volumique optimale. Les éprouvettes de sols traités possèdent une teneur en eau de 120% de la teneur en eau optimale en plus de l'eau nécessaire pour l'hydratation de la chaux (équivalent massique de la teneur en chaux) et une masse volumique de 95% de la masse volumique Proctor standard correspondante à cette teneur en eau. Le mode de compactage et la taille des éprouvettes ont été adaptées aux différents essais.

Certains résultats d'essais MoJET pour les éprouvettes en limon sont présentés aux figures 1.22 et 1.23. Deux types de sollicitations ont été utilisés : débit à $600 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ pendant 15 minutes ou débit à $2000 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ pendant 5 minutes.

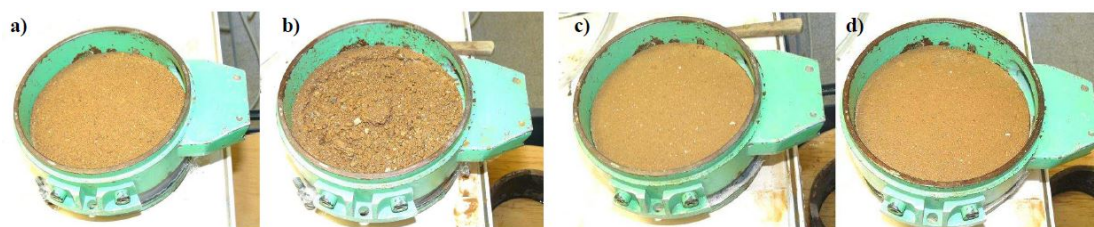


FIG. 1.22 – Surface de sol pour des essais MoJET en protocole classique sur les éprouvette à 7 jours de cure : (a) limon non traité avant l'essai et (b) après l'essai, (c) limon traité avant l'essai et (d) après l'essai [48].

Les mesures quantitatives des essais de la figure 1.23 confirment les observations qualitatives de la figure 1.22 : le matériau traité dès 7 jours de cure est quasiment insensible à l'érosion de surface. C'est d'ailleurs dans ce cadre et avec ce type d'observation qu'il a été décidé de proposer un protocole d'essai avec un débit plus élevé passant de 600 à $2000 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

Les essais sur les éprouvettes en argile ont présenté un comportement similaire.

Au bilan, les essais au MoJET avec le protocole standard n'ont pas montré d'érosion des matériaux traités tandis que la masse érodée de ces matériaux avec le protocole modifié est réduite d'un facteur 80 (au minimum) par rapport aux sols non-traités.

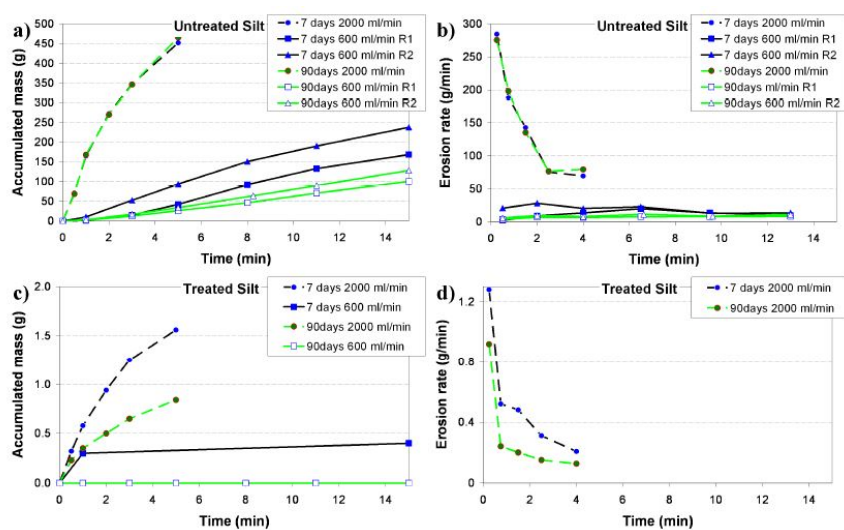


FIG. 1.23 – Résultats des essais MoJET à 7 et 90 jours de cure en fonction du temps : (a) masse cumulée et (b) taux d'érosion pour le limon non traité, (c) masse cumulée et (d) taux d'érosion pour le limon traité [48].

En ce qui concerne les essais HET, une observation qualitative d'essais sur éprouvettes de limon non traité ou traité est proposée à la figure 1.24 : aucune trace d'agrandissement du trou n'est observée sur l'éprouvette en sol traité. Cela est d'ailleurs confirmé, à la figure 1.24 par les observations effectuées au microscope électronique à balayage sur la surface du trou après essai : même le tracé du forage peut être encore observé sur la surface finale « érodée ».

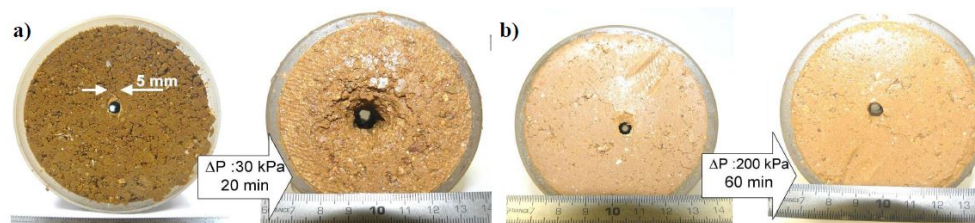


FIG. 1.24 – Photographies des éprouvettes HET avant et après essais : (a) limon non traité (différence de pression de 30 kPa pendant 20 min), (b) limon traité (différence de pression de 200 kPa pendant 60 min) [48].

Pour les éprouvettes en limon non traitées, les résultats des essais HET sont présentés à la figure 1.26 pour le sol limoneux non traité. Des comportements classiques sont observés avec une bonne répétabilité et une contrainte de cisaillement critique autour de 400 Pa (après 7 jours de cure) et autour de 500 Pa (après 90 jours de cure). La dispersivité des courbes est due à la taille maximale élevée des grains grossiers du sol (6,3 mm) qui rend l'érosion moins uniforme que celle des autres sols à grains fins habituellement testés avec le HET.

En ce qui concerne les éprouvettes de sols traités à la chaux (limon mais aussi argile), aucune érosion n'a été observée malgré les différences de pression ΔP très élevées

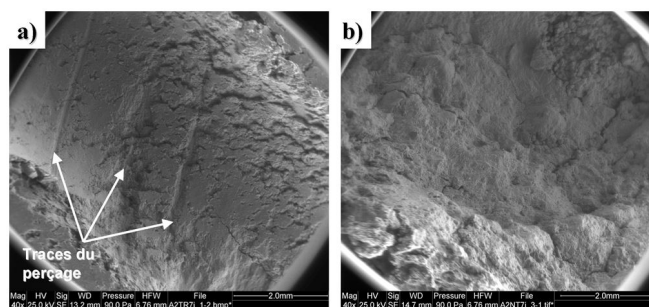


FIG. 1.25 – Images du trou final acquises par microscopie électronique à balayage : (a) limon traité et (b) limon non traité.

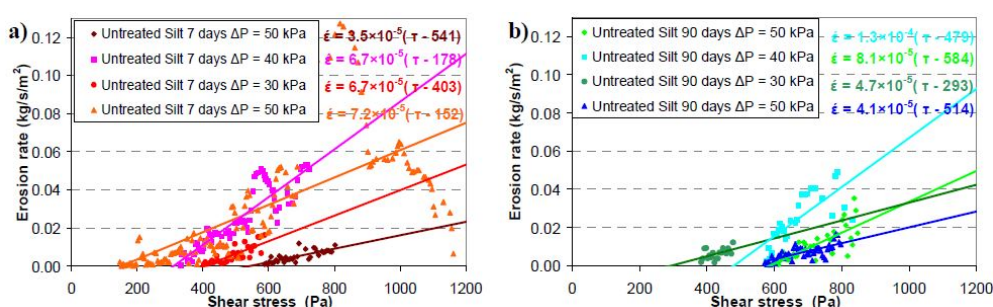


FIG. 1.26 – Résultats des essais HET réalisés sur les éprouvettes de limon non traité : (a) à 7 jours et (b) à 90 jours de cure. Les résultats sont comparables [48].

imposées pendant l'essai. La contrainte de cisaillement hydraulique maximale appliquée aux éprouvettes de sol traité était de 800 Pa minimum soit un facteur 2 par rapport à la contrainte de cisaillement critique pour les sols non traités. L'écoulement maximal a par ailleurs été appliqué pendant plus de 60 minutes sur ces éprouvettes en sols traités alors que, dans un essai classique, la charge dure environ 15 minutes.

Les résultats observationnels d'essais ACT sont présentés à la figure 1.27. Le limon non traité présente un gonflement de 1,5 mm en moyenne (en hauteur) après 10 minutes suivi par un affaissement après 15 minutes. En revanche, le limon traité a un gonflement de 0,3 mm après 5 minutes et sa géométrie reste ensuite stable pendant des dizaines de jours. Le volume final des éprouvettes en limon non traité est en moyenne 250% plus élevé que le volume initial contre 4% pour le limon traité à 7 jours et 2,5% pour le limon traité à 90 jours de cure.

Comme pour les essais MoJET et HET, les sols traités sont ainsi quasi-insensibles à l'eau via l'essai ACT (comparés aux matériaux non traités qui se comportent de manière classique) : phase de gonflement très faible et quasiment pas de désagrégation.

Au bilan, dans les différents aspects de résistance à l'érosion/la désagrégation, le traitement à la chaux représente un gain considérable. Cependant, il faut noter que les éprouvettes sont confectionnées au laboratoire avec des conditions bien contrôlées notamment au niveau de l'homogénéité et du compactage. Dans la pratique, à l'échelle des ouvrages et dans des conditions de réalisation industrielles, les conditions peuvent

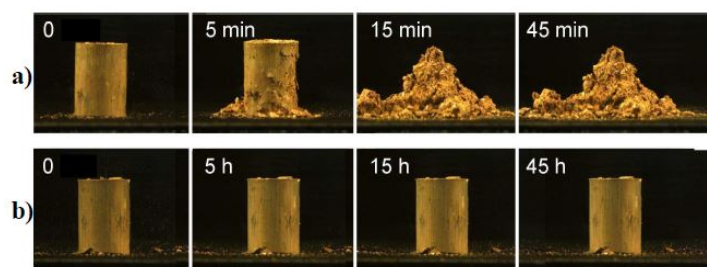


FIG. 1.27 – Résultats typiques d’essais ACT réalisés sur les éprouvettes de limon à 7 jours de cure : (a) sol non traité et (b) sol traité [48].

varier. En conséquence, après ces premiers travaux en milieux contrôlé, une étude a été entreprise sur ouvrages en vraie grandeur.

Essais sur ouvrages

Pour aller plus loin dans l’étude de la résistance à l’érosion des sols traités à la chaux, des essais *in situ* et en laboratoire ont été effectués sur les sols de deux ouvrages expérimentaux réalisés au Centre d’Expérimentation et de Recherches (CER) de Rouen du Cerema [40]. Ces ouvrages sont deux digues sèches en matériaux limoneux dont une est construite sans traitement et l’autre en sol traité à 2,5% de chaux en utilisant une station de malaxage mobile. Les matériaux ont été compactés en état humide à une teneur en eau de 17% ($w_{OPN} + 2\%$) pour l’ouvrage en limon non traité, et à 19,4% ($w_{OPN} + 1,6\%$) pour l’ouvrage en sol traité. La réalisation et une vue de ces ouvrages sont données à la figure 1.28. Ces ouvrages ont été réalisés en septembre 2011 et des campagnes d’essais ont eu lieu après 28 jours de cure (fin octobre 2011), 6 mois (fin mars 2012) et 1 an (début octobre 2012).



FIG. 1.28 – Réalisation des digues expérimentales : (a) production du matériaux traité, (b) mise en place et compaction avec un rouleau à pieds dameurs, (c) vue générale de l’ouvrage en sol traité, (d) vue générale des deux digues (en sol traité à gauche, en sol non traité à droite) [40].

Les essais à l'érodimètre à jets mobiles (MoJET) ont été effectués *in situ* tandis que les essais avec les dispositifs d'essai d'érosion de trou (HET) et d'émiettage amélioré (ACT) ont été réalisés en laboratoire sur échantillons prélevés dans les deux ouvrages.

Les observations (Fig. 1.29) et les résultats (Fig. 1.30) des essais MoJET sur site à 28 jours de cure sont de même nature que ceux effectués en conditions contrôlées dans l'étude au laboratoire. La masse érodée totale du matériau naturel est en moyenne de 900 g pour le protocole classique et 1000 g pour le protocole modifié contre 35 g et 80 g pour le matériau traité. Un facteur supérieur à 70 est donc observé entre les différentes masses érodées

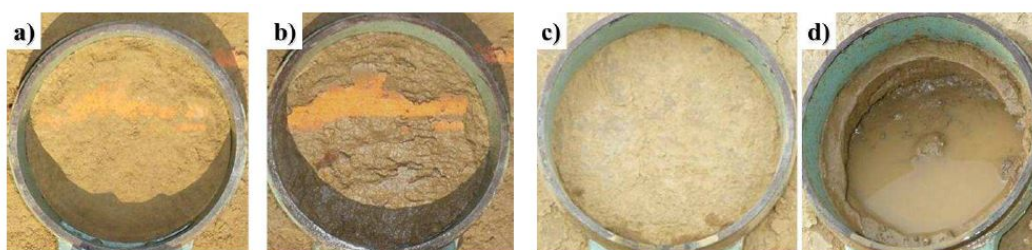


FIG. 1.29 – Surface de sol pour des essais MoJET en protocole classique sur les ouvrages à 28 jours de cure : (a) ouvrage traité avant l'essai et (b) après l'essai, (c) ouvrage non traité avant l'essai et (d) après l'essai [50].

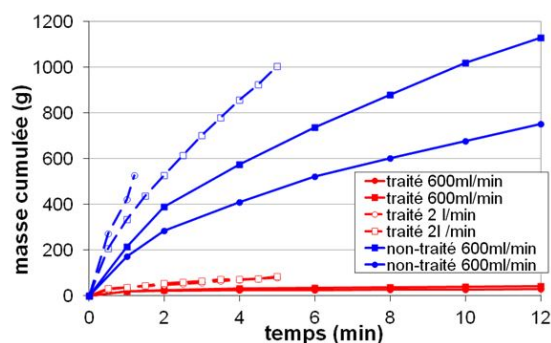


FIG. 1.30 – Masse cumulée en fonction du temps pour les essais MoJET à 28 jours de cure [50].

Il est à noter que, à cause de la très faible perméabilité de l'ouvrage traité, l'eau ruisselle autour de la trousse coupante et la profondeur d'infiltration se limite à quelques millimètres. En enlevant la couche superficielle à la truelle, il est possible d'observer que le sol reste à la teneur en eau d'origine.

Les essais MoJET ont été également effectués à 6 mois et 1 an de cure (i.e. après réalisation des ouvrages). Pour ces essais, une fine couche friable est présente à la surface. Elle témoigne d'un écaillage superficiel (de l'ordre du millimètre) du matériau. Concernant les essais à 180 jours, des essais ont donc été réalisés sur la surface « en état » de l'ouvrage et en enlevant délicatement la pellicule friable, à l'aide d'un pinceau comme présenté à la figure 1.31. Il existe systématiquement un écart entre les essais effectués

sur la surface initiale et ceux réalisés sur la surface nettoyée au pinceau. Cet écart est observé dans les premiers pas de temps (1 et 2 minutes) du fait de la sensibilité de cette pellicule de surface. Une fois cette pellicule peu cohésive érodée (lessivée), les tendances deviennent similaires.

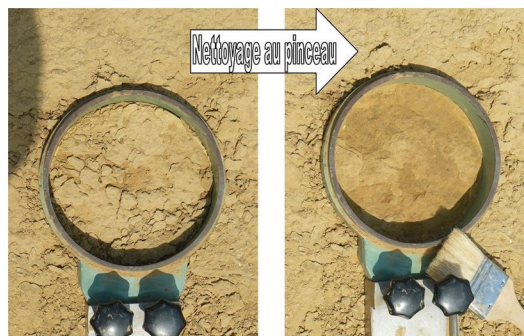


FIG. 1.31 – *Nettoyage de la couche écaillée de surface de l'ouvrage en sol traité à l'aide d'un pinceau.*

Les résultats de masse totale érodée dans différentes configurations (avec nettoyage préalable de la surface au pinceau) sont rassemblés dans le tableau 1.1.

TAB. 1.1 – *Masse totale cumulée des essais MoJET sur les digues expérimentales (protocole standard).*

Ouvrage	Temps de cure	Profondeur de l'essai (cm)	Masse totale érodée (g)
Digue non traitée	28 jours	0	1130
	6 mois	0	1000
Digue traitée	28 jours	0	35
	6 mois	0	40
	1 an	0	180
		2	80
		5	15
	0 sous terre végétale	50	

A 6 mois, les essais réalisés tant sur l'ouvrage naturel que traité (avec retrait de la couche friable) donnent des résultats similaires à ceux réalisés à 28 jours.

Concernant les essais à 1 an, seuls des essais sur le remblai traité ont été réalisés, à différentes profondeurs (en surface, à 2 et à 5 cm de profondeur) ainsi que sur une surface située sous une couche végétalisée. Il peut être remarqué qu'une quantité plus importante de sol est érodé en surface qu'en profondeur : passant de 180 g en surface à 80 et 15 g à respectivement 2 et 5 cm de profondeur. Ceci témoigne d'un affaiblissement léger de la résistance à l'érosion du matériau traité qui reste, tout de même très peu érodable en comparaison du matériaux non traité. Cet affaiblissement n'est que superficiel car, au delà d'une faible profondeur (une couche « sacrificielle »), des résistances à l'érosion identiques aux matériaux de surface à 28 jours sont retrouvés. Par ailleurs, la masse

cumulée pour la partie du remblai située sous la couche de végétalisation est de 50 g. La végétalisation, technique courante d'intégration esthétique des remblais dans leur environnement, permet donc vraisemblablement de protéger le remblai en sol traité des dégradations de surface qui peuvent être causées par l'interaction avec l'atmosphère et/ou les variations hydriques et de températures (hiver puis été).

Les essais avec les dispositifs d'essai d'érosion de trou (HET) et d'émiettage (ACT) ont été réalisés en laboratoire sur des échantillons prélevés dans les deux ouvrages. Les résultats sur les matériaux de l'ouvrage traité sont concordants avec les essais en laboratoire :

- une érosion qui n'a pu être réellement déclenchée avec le dispositif HET : contrainte seuil de 800 Pa minimum soit un facteur 4 par rapport à la contrainte de cisaillement critique appliquée au sol de l'ouvrage non traité évaluée à 180 Pa (Fig. 1.32) ;
- une quasi-insensibilité à l'eau via l'essai ACT comparée au comportement classique du sol de l'ouvrage non traité (Fig. 1.33).

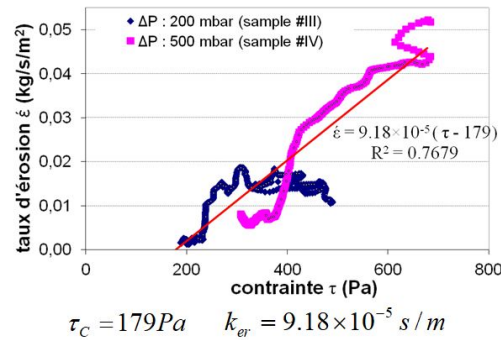


FIG. 1.32 – Résultats des essais HET réalisés sur les éprouvettes prélevées sur l'ouvrage en sol non traité : contrainte seuil τ_C et coefficient d'érosion k_{er} déduits de l'ajustement linéaire des données [50].

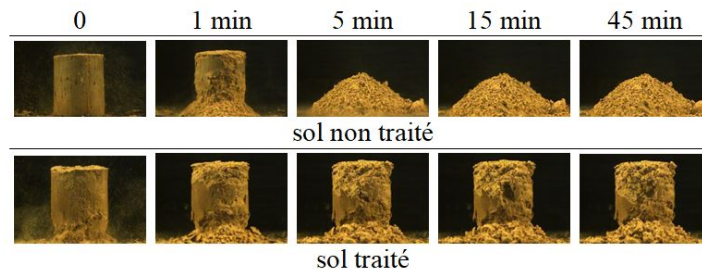


FIG. 1.33 – Résultats typiques d'essais ACT réalisés sur des échantillons prélevés à 28 jours sur les ouvrages en sol non traité (en haut) et en sol traité (en bas). Aucune évolution n'est observée au delà des 45min [50].

Dans l'ensemble des essais, le matériau issu de l'ouvrage traité à la chaux a donc présenté une résistance à l'érosion nettement plus élevée que le matériau naturel. Mis à part pour une couche « sacrificielle » de quelques centimètres qui évolue lentement dans

le temps, les propriétés du sol traité semblent se préserver sans dégradation pendant une longue durée de sollicitation hydraulique ce qui n'est pas le cas du sol non traité. Les résultats obtenus sont en concordance avec les essais effectués sur les sols préparés au laboratoire. Cette augmentation de la résistance et la diminution de la sensibilité face à l'érosion ne sont pas aussi importantes dans l'étude sur ouvrages que dans celle au laboratoire mais restent cependant très significatives par rapport à l'état naturel/non traité. Il convient également de souligner que les matériaux et les méthodes de préparation ne sont pas les mêmes. De plus, les techniques de prélèvement, en particulier, sont plus destructrices pour les matériaux *in situ* ce qui affecte le comportement de surface.

Au delà du bilan très favorable du traitement à la chaux pour l'augmentation significative de la résistance à l'érosion, ces travaux paramétriques complets, au laboratoire puis *in situ*, permettent de montrer la pertinence de l'utilisation des différents dispositifs d'essais pour la compréhension de ces sujets complexes.

1.3.2 Etude multiphysique de la durabilité des sols traités à la chaux pour une application aux digues maritimes

Les premiers travaux menés sur le sol-chaux et notamment l'ouvrage expérimental de Rouen ont permis de mettre en relief de certains éléments relatifs à l'importance de la temporalité et de l'environnement : temps de cure, vieillissement du matériau en contact avec l'extérieur... Il s'agissait, cependant d'un ouvrage non sollicité hydrauliquement. Pour aller plus loin, il convient ainsi de s'intéresser à l'évolution de l'ouvrage dans des conditions réelles et à sa capacité à assurer ses fonctions (notamment de protection) dans le temps aussi nommée « durabilité ». Cela a été possible dans le cadre du projet CPER-FEDER PACA Digue2020 dont un des objectifs était la construction et le suivi d'une digue en sol-chaux sur le littoral en région PACA.

L'étude de la durabilité d'un matériau s'appuie sur l'évaluation de la vitesse d'évolution de ses propriétés dans un environnement donné. En environnement maritime et côtier, la salinité et les alternances immersions-émersions sont deux sollicitations majeures susceptibles de détériorer les propriétés initiales d'un matériau. Dans la littérature, les travaux sur la durabilité des sols traités ciblent l'impact du temps de cure et parfois des cycles hydriques sur les propriétés mécaniques et hydromécaniques du matériau [86, 127]. Or d'autres propriétés du matériau sont également à prendre en compte, comme la résistance à l'érosion interne ou externe [110], à l'origine de 98% des ruptures d'ouvrages hydrauliques [83]. De plus, dans le cas des sols traités à la chaux, très peu de travaux existent quant à l'influence de la salinité sur le comportement au long terme du matériau [155]. Dans la perspective de la construction de la digue maritime expérimentale dénommée « plateforme » en sol-chaux du projet CPER-FEDER PACA Digue2020, une étude multiphysique de la durabilité du matériau a ainsi été menée au laboratoire [69]. L'objectif est d'accélérer le vieillissement du matériau par l'imposition de sollicitations environnementales cycliques et de caractériser le matériau à différents stades de vieillissement, tant sur le plan mécanique que de résistance à l'érosion ou par des mesures géophysiques. L'influence des paramètres initiaux du matériau sur son comportement au cours du temps est étudiée pour établir des critères de durabilité.

Etude paramétrique

L'étude de la durabilité d'un matériau s'appuie sur l'évaluation de la vitesse d'évolution de ses propriétés dans un environnement donné. Au laboratoire, l'objectif est alors de reproduire de manière contrôlée et accélérée les sollicitations climatiques représentatives de celles s'exerçant sur une digue maritime. L'objectif est alors de définir des lois d'évolution du matériau fonction de ses propriétés initiales et des sollicitations hydriques et chimiques qu'il subit. L'étude a été menée sur un limon prélevé dans la commune de Salin de Giraud proche de l'embouchure du Grand Rhône dont les caractéristiques sont très voisines du sol utilisé pour la plateforme Digue2020.

Afin d'étudier l'influence du traitement et de la mise en place forcément moins contrôlés sur site qu'en laboratoire, différents matériaux ont été préparés comme présenté dans les premières colonnes du tableau 1.2. Ils présentent des « défauts » par rapport à un matériau traité de référence : sous-traitement, sous-compactage, présence initiale de sel...

TAB. 1.2 – *Extrait de l'étude paramétrique.*

Nomenclature des échantillons	Nature de l'eau utilisée pour fabriquer les échantillons	Teneur massique en chaux	Densité sèche ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Temps de cure avant application des cycles hydriques	Nombre de cycles appliqués avant essais
TW2%d98 (référence)	Eau du robinet (TW Tap Water)	2%	1694±20	90 jours	0, 2, 4, 6, 8, 12
SW2%d98	Eau de mer artificielle (SW Sea Water)	2%	1694±25	90 jours	0, 2, 4, 6, 8, 12
TW2% d95	Eau du robinet (TW Tap Water)	2%	1634±15	90 jours	0, 2, 4, 6, 8, 12
TW1%d98	Eau du robinet (TW Tap Water)	1%	1694±20	90 jours	0, 2, 4, 6, 8, 12
NS (Natural soil)	Eau du robinet (TW Tap Water)	0%	1713±20		

La teneur en chaux du matériau de référence (en pourcentage de la masse sèche) a été choisie en suivant les recommandations usuelles des travaux de terrassement. Elle correspond au dosage minimal de la norme ASTM ASTM D6276 (PFC - point de fixation de la chaux) augmenté de 1%. Le PFC du sol utilisé étant de 1%, la teneur en chaux du matériau de référence a donc été choisie à 2%. L'objectif de densité de compactage a été fixé à 98% de la densité Proctor, et la teneur en eau a été choisie à la teneur optimale en eau +1%. Ces conditions de compactage permettent d'obtenir le taux de perméabilité le plus faible [127]. Dans ces conditions et préparé avec de l'eau du réseau (TW="Tap Water"), le matériau de référence est noté TW2%d98.

- Les matériaux présentant des « défauts » sont élaborés à partir de cette référence :
- sous traitement en chaux avec une teneur en chaux de 1% (correspondant au PFC) : TW1%d98 ;
 - sous compactage de 95% de l'OPN : TW2%**d95** ;

— utilisation d'eau de mer reconstituée (SW : "Salt Water") pour simuler la présence initiale de sel : **SW2%**.

Enfin, des échantillons sont reconstitués en utilisant uniquement du sol naturel afin de distinguer les performances liées au sol de celles liées au traitement à la chaux.

L'étude paramétrique, dont quelques résultats sont présentés à la suite est détaillée au tableau 1.2. La cure de 90 jours, avant les cycles hydriques, a lieu à température et teneur en eau constantes. Cette étude paramétrique est représentative des travaux complets menés dans la thèse de Margot de Baecque [69] qui incluent également des temps de cure de 28 jours et 1 an avant cyclage hydrique et essais.

Vieillessement accéléré

Afin de provoquer un vieillissement accéléré des échantillons qui s'approche des conditions de site, des cycles de séchage et d'humidification (cycles hydriques) ont été effectués. Les paramètres de ces cycles ont été choisis de manière à reproduire les conditions les plus défavorables pour le matériau. Comme représenté sur la partie droite de la figure 1.34, les échantillons ne sont pas confinés pendant le temps de cure et lors des cycles hydriques. Ils sont ainsi plutôt représentatifs du matériau de la digue de surface. La phase de séchage est contrôlée dans une chambre climatique (consigne de température 20°C, et d'hygrométrie 60%). Le temps de séchage est de 48 heures, et la teneur en eau obtenue est supérieure de 5% à la teneur minimale en eau possible dans ces conditions de séchage (une partie de l'eau reste captives). L'humidification des échantillons est effectuée par remontée capillaire. Les échantillons sont placés sur du papier filtre et une pierre poreuse sur de l'eau. Cette phase dure 24 heures. Pour accélérer l'homogénéisation de l'humidification, les échantillons sont retournés à mi-temps. L'évolution typique de la teneur en eau des échantillons est représentée sur la partie gauche de la figure 1.34. Comme précisé au tableau 1.2, de 0 à 12 cycles ont été appliqués avant les essais.

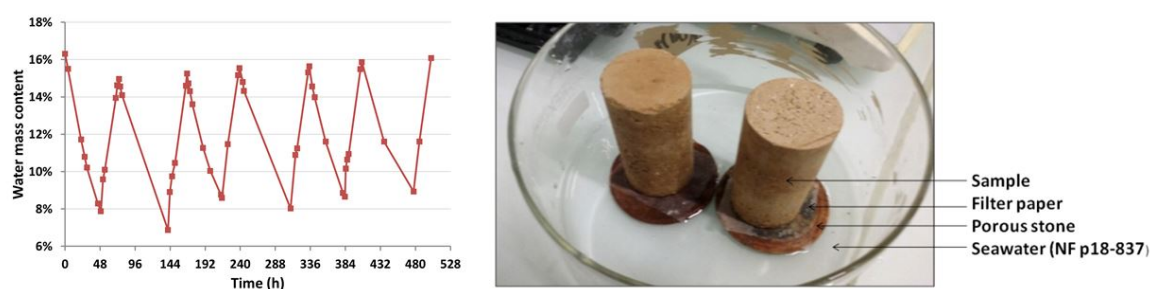


FIG. 1.34 – *Cycles hydriques des matériaux : exemple de variations des teneurs en eau durant les cycles et dispositif d'humidification [70].*

Essais et mesures réalisés

En complément des essais d'érosion HET et MoJET présentés dans la section précédente, des essais mécaniques, géophysiques et physico-chimiques ont aussi été menés.

La résistance en compression simple est la force maximale pouvant être exercée sur une éprouvette cylindrique non confinée d'élancement supérieur ou égale à deux, rapporté

à la section de l'éprouvette. La valeur de résistance en compression simple R_c (kPa) du matériau est un paramètre facile à obtenir qui a été souvent appliqué dans le domaine des sols traités à la chaux [9, 68].

Les caractéristiques géophysiques des matériaux ont notamment été mesurées par des mesures de résistivité électrique. Le dispositif expérimental, illustré à la figure 1.35, est constitué d'un résistivimètre Syscal Pro (IRIS Instruments), et d'une cellule à électrodes annulaires qui vient se plaquer contre l'éprouvette. Un courant électrique d'intensité I (mA) connue est injecté dans l'échantillon, entre ses faces opposées, et les différences de potentiel U (mV) entre les anneaux sont mesurées. Le rapport U/I multiplié par un facteur géométrique (m) donne la résistivité apparente ($\Omega \cdot m$) du volume de matériau entre les électrodes considérées [72]. En prenant l'hypothèse d'un milieu homogène et isotrope, la résistivité effective du milieu est déduite. La multiplicité des électrodes permet de juger de l'homogénéité du matériau, et si cette homogénéité est avérée d'obtenir la résistivité moyenne de l'échantillon. Ces mesures sont réalisées durant la cure et les cycles hydriques.

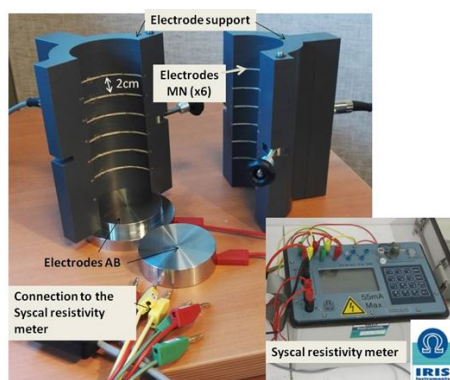


FIG. 1.35 – Cellule de mesure de la résistivité électrique du matériau [70].

Bien que non présentées ici, les caractéristiques géophysiques des matériaux ont également été mesurées par des mesures de vitesses de propagation des ondes mécaniques (ondes P et S) à l'aide d'éléments piézoélectriques.

Enfin, sur le plan microscopique, l'évolution de la distribution porale a également été suivie au cours de la cure et après sollicitation hydrique par la méthode de porosimétrie à intrusion au mercure (PIM). L'observation au MEBE (Microscope Electronique à Balayage avec chambre Environnementale) permet de suivre qualitativement la forme et l'organisation des phases cimentaires dans le matériau.

Résultats des essais d'érosion

Les résultats typiques des essais d'érosion de trou (HET) pour les différents matériaux avec un temps de cure de 90 jours sans cycle hydrique sont illustrés à la figure 1.36(a). Notons que, grâce à une modification du dispositif d'essai, il a été possible d'atteindre des contraintes plus importantes que dans les études précédentes. Les lois d'érosion (1.3) y sont également représentées : $\dot{\epsilon} = k_{er}(\tau - \tau_C)$ pour $\tau > \tau_C$. À l'état initial (pas de cycle), la résistance à l'érosion dépend de la formulation et de la densité du matériau. Les matériaux salés (SW2%d98) et non salés (TW2%d98) ont une résistance à l'érosion

très proche, avec une valeur de contrainte seuil τ_C proche de 1600 Pa. En réduisant de moitié le traitement à la chaux (TW1%d98) par rapport au matériau de référence, une baisse significative d'un facteur 2,5 de la valeur de τ_C est observée. Une baisse du même ordre est observée avec la diminution de la densité de 98% à 95% de l'OPN. La teneur en chaux et la densité sont donc des paramètres décisifs pour la résistance à l'érosion des sols traités à la chaux. En l'absence de contraintes environnementales (cycles), plus la teneur en chaux et la densité sont élevées, plus le matériau est résistant à l'érosion.

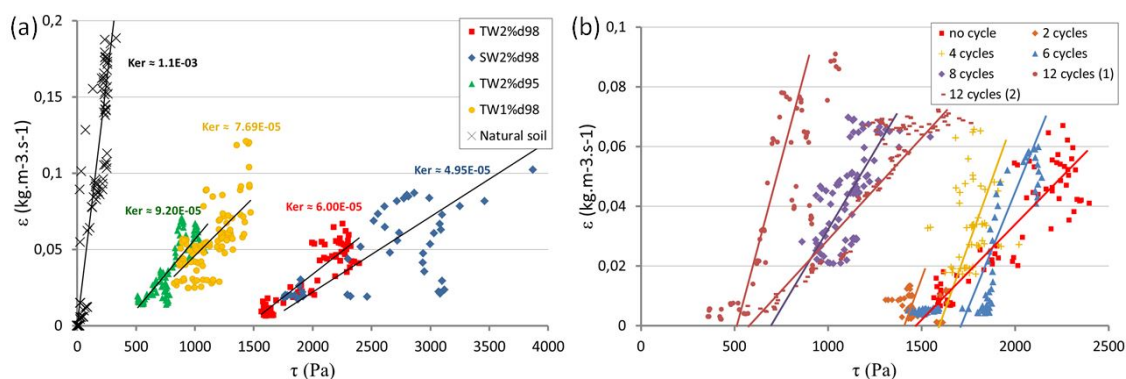


FIG. 1.36 – Résultats des essais d'érosion de trou HET : (a) comparaison pour les différents matériaux avec un temps de cure de 90 jours [aucun cycle], (b) évolution pour le matériau de référence (TW2%d98) pour un nombre croissant de cycles hydriques [70].

La résistance à l'érosion varie pour tous les matériaux en fonction du nombre de cycles hydriques. La figure 1.36(b) représente les résultats de l'étude HET sur le matériau de référence TW2%d98. Chaque essai a été effectué deux à trois fois, mais pour une meilleure lisibilité, un seul essai est présenté (à l'exception de deux essais à 12 cycles en raison de la grande variabilité des résultats). Les résultats montrent trois comportements distincts mais évolutifs du matériau, en l'absence de cycles, après 2 à 6 cycles et au-delà de 8 cycles. En l'absence de cycles, la contrainte d'érosion critique τ_C est d'environ 1450 Pa, et le coefficient d'érosion k_{er} est d'environ $6.10^{-5} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$. Après 2 cycles, la valeur de τ_C reste presque identique à la valeur initiale (pas de cycle), mais le coefficient d'érosion k_{er} double. Après 4 et 6 cycles, la valeur de τ_C reste égale à la valeur initiale à ± 100 Pa. Après 8 cycles, τ_C tombe à environ 800 Pa, soit 45% de moins que la valeur initiale. Le coefficient d'érosion k_{er} à 8 cycles est le même qu'à 2 et 4 cycles. À 12 cycles, τ_C diminue de 200 Pa par rapport à sa valeur à 8 cycles, soit une diminution de 15% supplémentaire.

L'évolution du coefficient d'érosion k_{er} en fonction de la contrainte de cisaillement critique τ_C et du nombre de cycles est représentée sur la figure 1.37. Cette figure montre les différentes cinétiques de dégradation liées aux cycles hydriques en fonction du matériau. Le matériau traité avec 1% de chaux (TW1%d98) a la plus faible résistance à l'érosion (k_{er} le plus grand et τ_C le plus petit). C'est aussi le matériau avec le plus fort taux d'augmentation du coefficient d'érosion avec le nombre de cycles appliqués. Le matériau TW1%d98 est donc le matériau le moins durable en termes de résistance à l'érosion. Le comportement du matériau traité avec 2% de chaux mais compacté à 95% d'OPN (TW2%d95) a un comportement proche de celui du matériau traité avec 1% de chaux mais avec des valeurs de k_{er} inférieures. Le matériau de référence TW2%d98 est celui pour lequel les 6 premiers cycles hydriques ont le moins d'impact sur la valeur de τ_C . En

revanche, le coefficient d'érosion et donc le taux d'érosion du matériau est plus important dans le cas du matériau de référence que dans le cas d'un sol salin traité à la chaux dans les mêmes proportions (SW2%d98). La salinité du sol pourrait donc être un avantage en termes de durabilité par rapport à la résistance à l'érosion de trou.

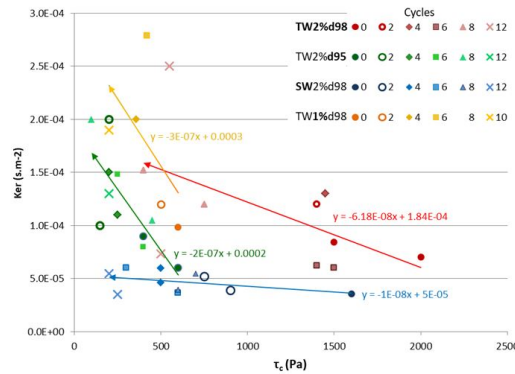


FIG. 1.37 – Résultats des paramètres des essais d'érosion de trou HET (τ_C , k_{er}) pour les différents matériaux avec un temps de cure de 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques (flèches) [70].

Les essais d'érosion par jets mobiles (MoJET) donnent des résultats très différents et plus variables comme présentés à la figure 1.38. Pour le matériau de référence (TW2%d98), les teneurs en eau des échantillons après cycles sont également très variables entre les essais, ce qui rend l'interprétation difficile. L'unique mesure à deux cycles n'est pas interprétable. Pour le matériau à 4 cycles, la masse de sol érodé est plus importante que pour le matériau non cyclé alors que la teneur en eau est supérieure de 3%. L'application de 4 cycles hydriques semble ainsi dégrader la résistance du sol à l'érosion externe. Inversement, après 6 cycles, la masse finale érodée est inférieure d'environ 20 g à celle correspondant aux essais non cyclés. L'observation visuelle (Fig. 1.38 à droite) montre la formation d'une croûte à la surface de l'échantillon. Cette croûte contient, entre autres, du chlorure de sodium cristallisé (NaCl). La formation de cette croûte superficielle augmente donc la résistance à l'érosion externe du matériau. Dans les essais présentés ici, la résistance à l'érosion externe semble donc augmenter avec le nombre de cycles hydrique à l'eau de mer.

Comparaison avec les mesures géophysiques

Un exemple de comparaison entre résistance à la compression (R_c) et initiation de l'érosion interne (contrainte de cisaillement critique τ_C) est faite sur la figure 1.39. Elle montre les valeurs de τ_C et de R_c pour les quatre matériaux traités après un nombre croissant de cycles hydriques. Chaque point correspond à la valeur moyenne de 2 mesures pour la contrainte seuil τ_C et 3 mesures pour la résistance à la compression R_c . La relation entre τ_C et R_c dépend fortement de la composition et de la densité des matériaux. Les valeurs de ces 2 propriétés chutent sous l'effet des cycles hydriques. Une analyse, matériau par matériau, fait apparaître des relations de proportionnalité différentes selon de la composition et de la densité des matériaux. Les pentes des droites de régression linéaire augmentent avec la teneur en chaux et avec la densité. La dispersion des valeurs

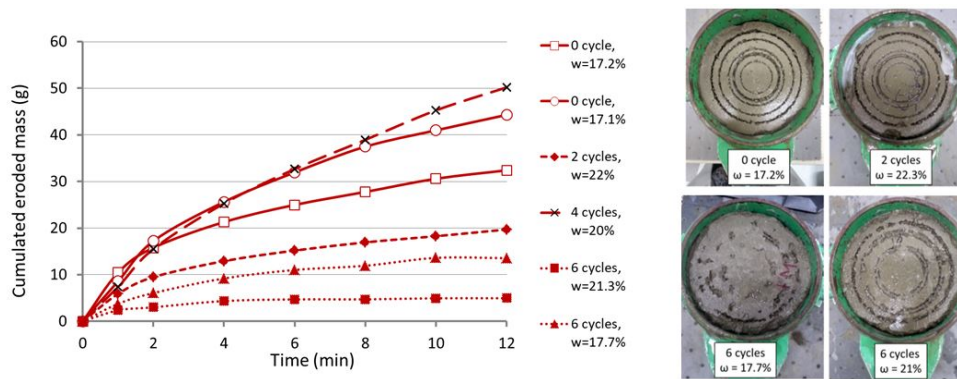


FIG. 1.38 – Résultats des essais d'érosion à jets mobiles MoJET : évolution pour le matériau de référence (TW2%d98) avec un temps de cure de 90 jours pour un nombre croissant de cycles hydriques et photos des échantillons après essai [70].

dépend également des formulations. La résistance mécanique en compression simple R_c et la contrainte tangentielle critique τ_C définissant les conditions d'initiation de l'érosion diminuent lorsque le matériau subit des cycles de séchage-humidification à l'eau de mer. Les diminutions de ces deux facteurs sont corrélées car elles correspondent toutes les 2 à une dégradation croissante du matériau.

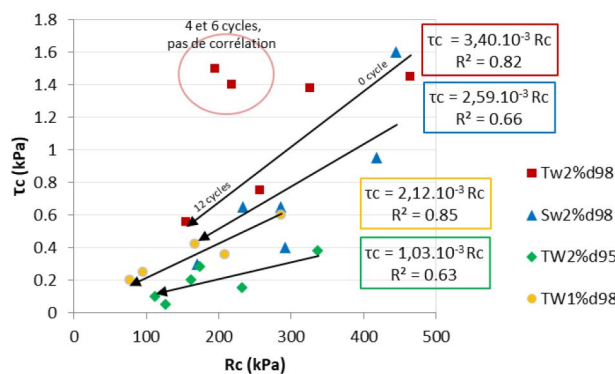


FIG. 1.39 – Comparaison entre les essais d'érosion HET (τ_C) et les mesures de résistance à la compression (R_c) pour les différents matériaux (ajustement linéaire) [69].

La figure 1.40(a) présente la résistivité électrique et la teneur en eau du matériau de référence (TW2%d98) pendant les cycles hydriques. À l'état initial, la teneur en eau est de 20% et la résistivité est de $2,5 \Omega \cdot m$. La première phase de séchage réduit la teneur en eau à 8% et la résistivité est alors de $13 \Omega \cdot m$. Au cours des 3 premiers cycles, la résistivité correspondant à l'état « sec » du matériau diminue de 75% par rapport à la résistivité à l'état « sec » du premier cycle (1 cycle : $13 \Omega \cdot m$; 3 cycles : $2,5 \Omega \cdot m$). Au cours des cycles suivants, la valeur de la résistivité à l'état « sec » diminue irrégulièrement car elle est très sensible aux variations de la teneur en eau. À l'état « humide », la résistivité diminue également rapidement avec le nombre de cycles jusqu'à 3 cycles, puis diminue extrêmement lentement jusqu'à 12 cycles. Contrairement aux états « secs », la résistivité diminue de manière régulière, car elle est moins sensible aux petites variations

de la teneur en eau. La décroissance rapide pendant les trois premiers cycles pourrait correspondre à une phase de pénétration du sel dans l'échantillon jusqu'à saturation vers $1,1 \Omega \cdot m$.

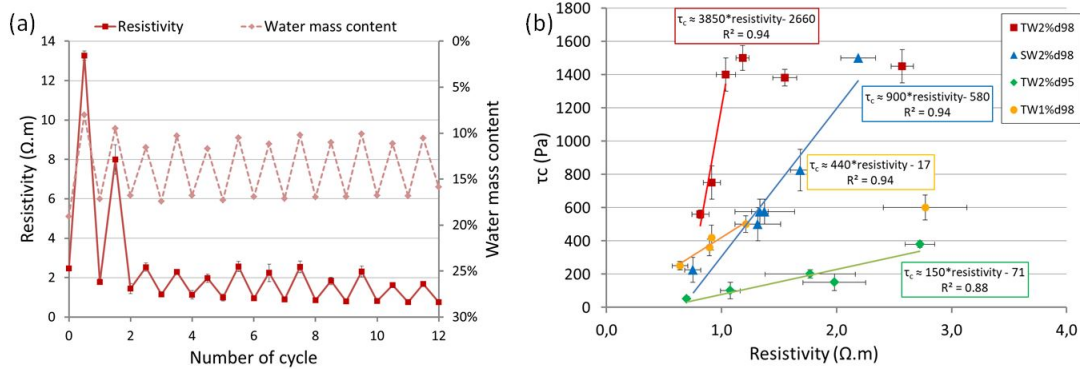


FIG. 1.40 – Mesures de résistivité pour un nombre croissant de cycles hydriques : (a) évolution des mesures de la teneur en eau et de la résistivité électrique pour le matériau de référence (TW2%d98), (b) comparaison entre les essais d'érosion HET (τ_C) et les mesures de résistivité pour les différents matériaux (ajustement linéaire) [70].

Un exemple de comparaison entre résistivité électrique et initiation de l'érosion interne (contrainte de cisaillement critique τ_C) est faite sur la figure 1.40(b). Elle montre les valeurs de τ_C et de résistivité pour les quatre matériaux traités après un nombre croissant de cycles hydriques. Chaque point correspond à la valeur moyenne de 2 mesures pour la contrainte seuil τ_C et 3 mesures pour la résistivité. La relation entre τ_C et la résistivité dépend fortement de la composition et de la densité des matériaux. Le taux de diminution de la résistivité est du même ordre de grandeur pour les matériaux initialement non salés, mais les taux de diminution de la contrainte de cisaillement critique τ_C diffèrent grandement d'un matériau à l'autre. La résistivité est principalement contrôlée par la salinité de l'eau interstitielle, la mesure est peu sensible aux variations liées à la dégradation des composés cimentaires résultant du traitement à la chaux, alors que les conditions d'initiation de l'érosion (τ_C) dépendent fortement de la quantité et de l'état des composés cimentaires. La salinité de l'eau interstitielle et l'état des composés cimentaires dépendent cependant tous les 2 du même paramètre : le nombre de cycles subis par le sol traité. Cette variable commune explique les corrélations entre les valeurs observées de la contrainte de cisaillement critique τ_C et la résistivité. Les conséquences des cycles sur les lois de l'érosion étant très différentes selon les matériaux, cela explique pourquoi une forte variation des corrélations est observée en fonction de la teneur en chaux et de la densité.

Cadre de l'étude sur la plateforme Digue2020

De nombreux échanges sont intervenus entre partenaires pour concevoir l'ouvrage expérimental (la plateforme) Digue2020. Ils ont conduit à définir les différents traitements employés ainsi que l'instrumentation déployées, avec l'objectif pour l'Université Gustave Eiffel de rapprocher le plus possible les observations terrain et laboratoire (méthodes et matériaux).

La plateforme en sol traité à la chaux Digue2020 a été réalisé entre fin 2019 et mi 2020 en Camargue sur une partie d'un linéaire géré par le Symadrem entre l'étang du Fangassier et du Galabert [75]. La figure 1.41 présente une vue de l'ouvrage.

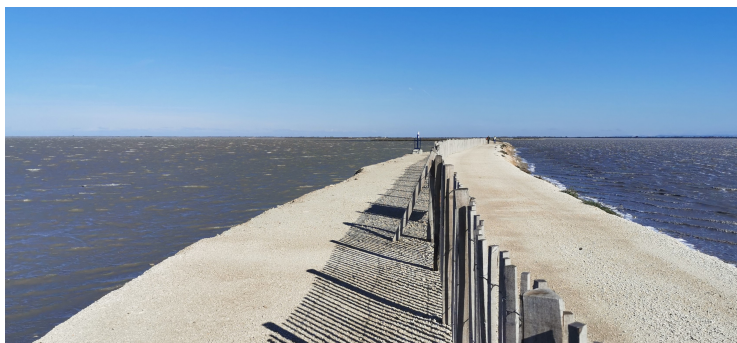


FIG. 1.41 – Vue générale de la plateforme Digue2020, la partie instrumentée est sur la gauche.

L'Inrae (ex-Irstea) a piloté la construction de l'ouvrage, mais chaque acteur du projet a géré la définition de sa propre instrumentation. Comme présenté à la figure 1.42, l'ouvrage a été divisé en quatre plots expérimentaux réalisés avec un sol naturel proche de celui testé expérimentalement et traité avec différentes caractéristiques. L'Université Gustave Eiffel (laboratoire GERS/GéoEND) a instrumenté les plots 3 et 4. Les caractéristiques de traitement et de compaction du plot 3 permettent en effet d'être au plus proche du matériau de référence utilisé au laboratoire (matériau TW2% d98 du tableau 1.2) tandis que le plot 4 sert de référence.

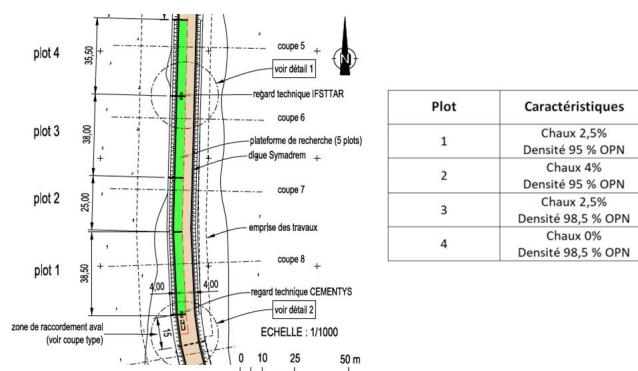


FIG. 1.42 – Plan de la plateforme Digue2020 (source : ISL Ingénierie) et matériaux utilisés pour les différents plots expérimentaux (partie en vert).

Deux dispositifs de monitoring géophysique ont été installés à 20 cm sous la crête de l'ouvrage, un pour des mesures de résistivité électrique et un pour des mesures sismiques de manière analogue aux techniques utilisées au laboratoire. L'implantation de ces dispositifs est représentée à la figure 1.43.

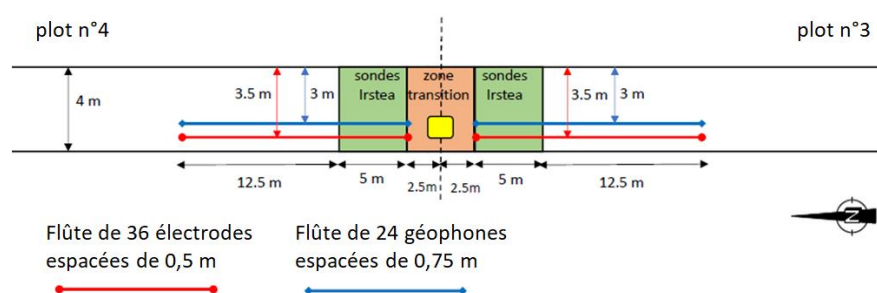


FIG. 1.43 – Instrumentation géophysique des plots 3 et 4.

1.4 Conclusion et perspectives de la thématique

Dans l'objectif de mieux caractériser les géomatériaux et les ouvrages vis-à-vis des phénomènes d'érosion, les travaux présentés dans ce chapitre ont permis des avancées significatives tant sur la mise au point de dispositifs et méthodes d'essais que sur l'application de ces derniers à la question pratique de l'utilisation de sols traités à la chaux dans le contexte des ouvrages hydrauliques en particulier côtier. Ils illustrent aussi l'intérêt d'approches multiphysiques pour la compréhension de phénomènes complexes.

Ils se poursuivent au travers de différentes actions :

- suivi en particulier géophysique de la plate-forme Digue2020 (via la convention avec la DGPR) ;
- interprétation par modélisation numérique de la durabilité des sols traités ;
- suivi d'ouvrage traité pour une application aux voies navigables (en collaboration avec la Société du Canal Seine-Nord Europe - SCSNE).

Pour avancer, à court/moyen terme, sur la compréhension du vieillissement d'un ouvrage en sol traité puis, à plus long terme sur un suivi opérationnel des ouvrages de protection, la plate-forme Digue2020 est un ouvrage et un outil particulièrement adapté. La mise en place des instrumentations de résistivité électrique et sismiques devrait être, dans ce contexte, d'une contribution précieuse. Lors de la première campagne d'essais, des différences significatives de propriétés géophysiques, que ce soit par mesures géoélectriques ou par mesures sismiques en ondes de surface, ont été relevées entre le sol traité et le sol non traité. Ces différences semblent cohérentes avec l'étude au laboratoire, même si ce point devra être étudié dans le détail à plus long terme.

En collaboration interne au sein du laboratoire SRO, de premiers travaux numériques sur COMSOL ont été menés en 2020 et 2021 ont permis d'observer de très bonnes cohérences en particulier sur la teneur en eau lors des cycles entre mesures expérimentales au laboratoire (Fig. 1.34) et modélisation multi-physique (Fig. 1.44) [93]. Cette approche est prometteuse pour mieux comprendre certains aspects de la durabilité du matériau de l'échelle microscopique jusqu'à l'échelle de l'éprouvette. Elle permettra aussi de donner des pistes de développement (voire d'outils de prédiction) pour appréhender le fonctionnement des sols traités de l'échelle du matériau contrôlé (en laboratoire / vieillissement accéléré) à l'échelle du site (ouvrage réel / sollicitations réelles sur une longue durée).

En ce qui concerne le vieillissement des ouvrages en sol-chaux, l'étude de la dégradation en surface du matériaux se poursuit sur un ouvrage expérimental de la Société du Canal Seine - Nord Europe (SCSNE) illustré à la figure 1.45. Cet ouvrage est un bassin

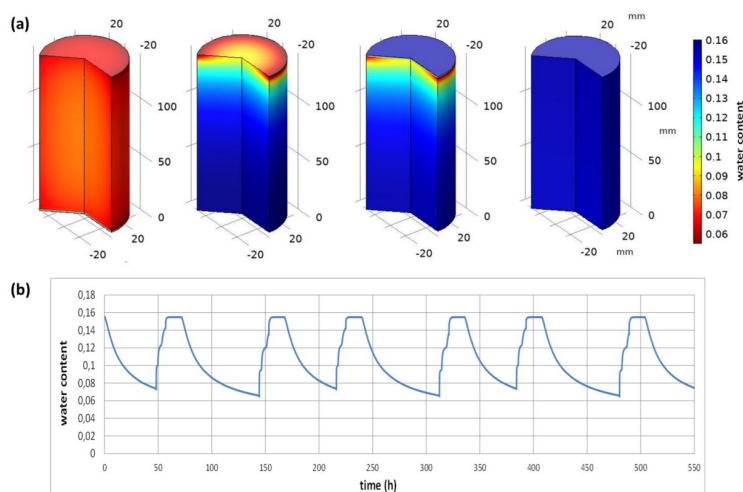


FIG. 1.44 – *Modélisation numérique (travaux sur Comsol) des cycles hydriques : (a) visualisation des étapes d’humidification par le bas puis le haut de l’éprouvette, (b) cycles de séchage-humidification [93].*

témoin de rétention d’eau situé sur la commune de Cizancourt dans le département de la Somme. Il a été réalisé à partir de sols excavés dans le cadre du projet du Canal Seine - Nord Europe. Ces sols ont été traités à la chaux et au liant hydraulique afin de produire l’ouvrage par une succession de couches décimétriques traitées et compactées. L’ouvrage vise à évaluer les possibilités de rétention d’eau dans le temps de ce type de matériau et son évolution pour évaluer les potentialités de réemploi des terres excavés. Les 2 premières campagnes menées permettent de retrouver les observations réalisées sur les remblais du CER de Rouen.

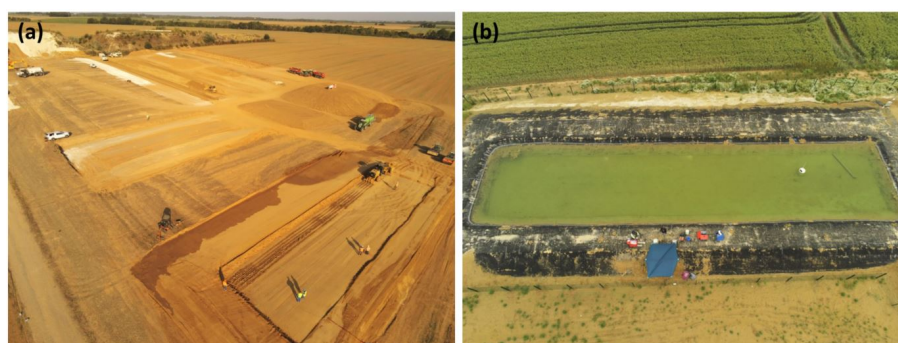


FIG. 1.45 – *Site d’essai de la SCSNE à Cizancourt : (a) bassin (en bas à droite de l’image) et planches d’essai en cours de construction, (b) bassin réalisé et rempli (essais d’érosion en cours au centre en bas de l’image).*

Chapitre 2

Écoulements complexes dans les milieux poreux et les ouvrages en terre

2.1 Contexte, enjeux et démarche

La question des écoulements plus ou moins complexes dans les milieux poreux est un sujet qui intéresse énormément le génie civil et plus généralement l'industrie pour un grand nombre de situations : risques naturels et tenue des ouvrages de retenue ou de protection, gestion des eaux souterraines, traitement des sols pollués, injection de pâtes de ciment dans des sols mais aussi récupération assistée de pétrole par réinjection des gaz de production ou bien description de la propagation et filtration du sang au travers des reins. . .

Nous avons déjà présenté, dans le chapitre 1, la question de la tenue des digues et remblais face aux risques hydrauliques. Le point de vue apporté y était sur la description et la caractérisation des écoulements externes ou (interne) de surface. Nous traiterons dans ce chapitre le cas des sols ou des ouvrages en terre généralement saturés avec un écoulement interne, situations typiquement rencontrées dans les cas de l'érosion interne de type suffusion ou du colmatage.

Pour avancer sur la description et la caractérisation de ces situations, il apparaît nécessaire de développer :

- des expériences et modélisations à différentes échelles permettant de lier les grandeurs physiques entre elles ;
- des essais capables de reproduire des situations complexes ;
- des lois suffisamment simples pour être transposables à la pratique. . .

Les travaux décrits dans ce chapitre ont été menés dans le cadre, ou en rapport, avec plusieurs projets déjà cités : projets ANR et PN ERINOH, opération de recherche commune Ifsttar-Cerema DOFEAS. Ils se sont déroulés dans le cadre d'une importante collaboration avec les équipes Rhéophysique et Géotechnique (CERMES) de l'UMR Navier (Univ. Eiffel, ENPC, CNRS).

J'ai ainsi contribué à l'encadrement des travaux de thèse de Xavier Clain [65], Quoc Quan Truong [141], Thibaud Chevalier [58] et Rachid Fellag [78].

Par les thématiques traitées et leurs caractères plus fondamentaux, ces travaux sont certainement les plus en lien avec les sujets que j'ai pu développer dans ma propre

thèse [45] traitant d'écoulement et d'injection de suspensions granulaires dans une configuration confinée particulière (cellule de Hele-Shaw) [46, 54, 55, 100].

Dans ce chapitre, j'aborderai, dans un premier temps, les développements autour de la caractérisation de l'injection de fluide complexes dans les milieux poreux par des approches macroscopiques puis microscopiques modèles. Nous verrons, dans un second temps, comment un nouveau dispositif expérimental de grande taille a permis l'avancer des connaissances sur le sujet de l'injection de pâtes ou colmatage et la suffusion dans les sols. Je conclurai sur un rapide bilan et les perspectives de la thématique. S'agissant de travaux plus anciens et dont les développements récents sont moins nombreux que ceux des chapitres 1 et 3, je décrirai de manière plus sommaire (et illustrative) les approches menées et les connaissances produites.

2.2 Ecoulement de fluide complexes dans les milieux poreux

Il existe une large gamme de fluides injectés, en particulier en génie civil ou dans l'industrie pétrolière, qui présentent un comportement fortement non newtonien. Il s'agit notamment des fluides à seuil : soumis à une contrainte d'écoulement, ils ne s'écoulent que lorsque la contrainte qui leur est appliquée est supérieure à une valeur critique. Ces fluides peuvent être des émulsions, des mousses, des suspensions argileuses ou même certains gels polymères. En ce qui concerne l'écoulement de ces matériaux dans des milieux poreux, ce caractère spécifique par rapport à la contrainte d'écoulement est susceptible d'induire des propriétés particulières qui sont assez mal identifiées [6, 42, 118].

Pour améliorer les connaissances sur ces écoulements de fluides complexes, plus spécifiquement des fluides à seuil, dans les milieux poreux deux approches ont été menées : une approche macroscopique visant à construire une loi d'écoulement à partir des propriétés séparées du fluide d'un côté et du milieu poreux de l'autre et une approche microscopique pour mieux comprendre les spécificités de l'écoulement de ces fluides dans une situation complexe de pores connectés.

2.2.1 Caractérisation macroscopique

Un fluide à seuil est un matériau qui a deux comportements suivant que la valeur de la contrainte qui lui est appliquée est supérieure ou inférieure à une contrainte de cisaillement critique τ_C . En dessous de cette limite, il se comporte comme un solide élastique. Au delà de cette contrainte, il se comporte comme un fluide visqueux ou, plus généralement, comme un fluide rhéo-fluidifiant. Le modèle rhéologique le plus courant pour décrire la loi de comportement de ces fluides est le modèle de Herschel–Bulkley [97]. En cisaillement simple, cette loi s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= 0 && \text{pour } \tau \leq \tau_C \text{ (régime solide),} \\ \tau &= \tau_C + k\dot{\gamma}^n && \text{pour } \tau > \tau_C \text{ (régime liquide),} \end{aligned} \quad (2.1)$$

où τ (Pa) est la contrainte de cisaillement, $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) le taux de cisaillement, τ_C (Pa) est la contrainte critique de cisaillement, k ($Pa \cdot s^n$) la consistance et n (-) l'indice de comportement.

La figure 2.1 rassemble des données expérimentales typiques obtenues avec un rhéomètre et un ajustement par la loi (2.1) de deux fluides à seuil différents : une solution de polymères (Carpopol) et une émulsion de gouttes d'eau saumurée dispersées dans une huile à l'aide de surfactants.

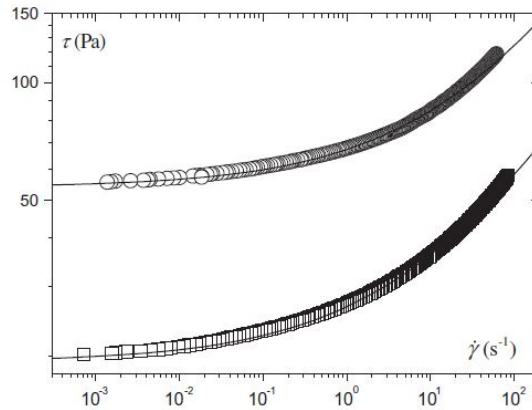


FIG. 2.1 – Courbes d'écoulement typique de 2 fluides à seuil et ajustement avec un modèle d'Herschel-Bulkley : ○ solution de Caropol ($\tau_C = 19,3$ Pa ; $k = 7,4$ Pa \cdot s n ; $n = 0,36$), □ émulsion ($\tau_C = 54$ Pa ; $k = 13,4$ Pa \cdot s n ; $n = 0,36$) [59].

Selon les concentrations de polymères en solution ou celles des différentes phases de l'émulsion, il est possible de faire varier les propriétés rhéologiques de ces fluides notamment leur seuil τ_C (entre 8 et 71 Pa) et leur consistance k (entre 3,6 et 49 Pa \cdot s n) avec n fixé à 0,36.

Pour caractériser l'écoulement de ces fluides dans un milieu poreux modèle, il a fallu minimiser différents problèmes expérimentaux. Le dispositif expérimental est présenté à la figure 2.2. Le milieu poreux modèle est constitué de billes de verre avec une faible polydispersité et un diamètre D qui a été varié entre 0,26 et 2 mm.

Ce dispositif et le protocole d'essai spécifiquement adaptés [59, 65] permettent de :

- minimiser les écoulements parasites par la mise sous confinement du milieu poreux ;
- contrôler les paramètres d'injection par la mesure de la pression d'huile p_i dans une cellule huile-fluide ;
- suivre le débit par la mesure en continu de la masse sortante du dispositif ;
- compenser les pertes de charge du circuit global en « soustrayant » aux résultats expérimentaux avec le milieu poreux des mesures réalisés avec un « fantôme », un tube rigide et vide.

Il a ainsi pu être tracé les courbes caractéristiques d'écoulement de fluide à seuil dans les milieux poreux illustrées à la figure 2.3. Ces courbes représentent la relation entre gradient de pression ∇p et vitesse débitante dans le milieu poreux V .

De manière complémentaire, une analyse dimensionnelle et des calculs analytiques simples sur des écoulements modèles en conduites ou en réseaux de conduites permettent de définir une loi d'écoulement généralisée (de type Darcy) pour un fluide à seuil au travers d'un milieu poreux :

$$D\nabla p = \alpha\tau_C + \beta k \left(\frac{V}{D} \right)^n . \quad (2.2)$$

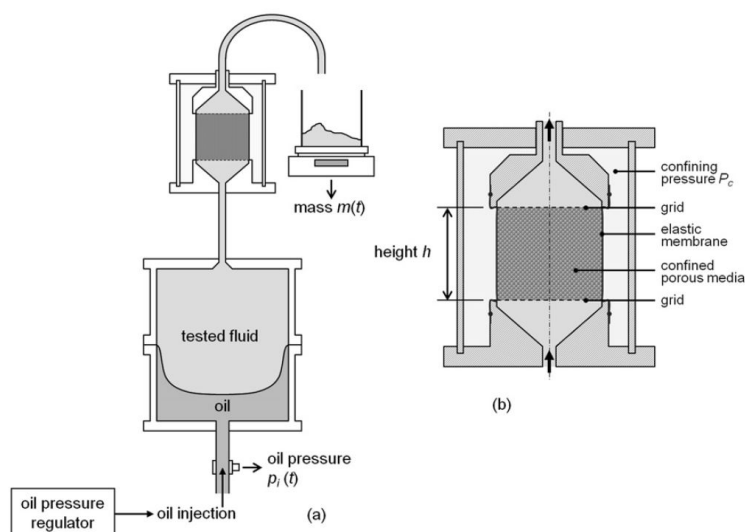


FIG. 2.2 – *Dispositif d'essai d'injection : (a) schéma du dispositif complet, (b) coupe de la cellule d'essai [59].*

avec α et β des paramètres qui dépendent du type de milieux poreux (hors taille caractéristique) et de la nature du fluide à seuil considéré. Ainsi, l'étude paramétrique menée a permis de valider cette loi et de trouver : $\alpha = 5,5$ pour les émulsions, $\alpha = 12$ pour les solutions de Carbopol et $\beta = 85$ pour les deux types de fluide.

2.2.2 Description microscopique de l'écoulement

Afin de caractériser plus en détails les écoulements, les écoulements peuvent être observés à une échelle locale grâce à l'imageur par résonance magnétique nucléaire (RMN) du laboratoire Navier. Deux types d'observations ont pu être ainsi faites :

- pour des milieux avec des pores de grandes dimensions, des images de vitesse en deux dimensions [61, 62] ;
- quelle que soit la taille des pores, des densités de vitesse moyennées sur l'ensemble du milieu poreux étudié [62].

Pour réaliser ces expériences, des optimisations particulières des séquences RMN ont été nécessaires pour dimensionner l'expérience dans son ensemble et obtenir les densités de vitesses [60].

Outre des milieux poreux analogues à ceux de la section précédente constitués de billes de verre (collées dans cette étude), des pores modèles comme représentés à la figure 2.4 ont été utilisés. Des émulsions de gouttes d'eau saumurée dispersées dans une huile à l'aide de surfactants ont été utilisées car elle permettent d'être bien imagées/suivies par RMN.

Différentes vitesses d'injection ont été imposées permettant d'étudier les caractéristiques de l'écoulement selon le régime d'écoulement donné par le nombre de Bingham qui caractérise le rapport entre les composantes indépendante (élastoplastique) et variable (visqueuse) de la loi de comportement (2.1) : $Bi = \tau_C / k\dot{\gamma}^n$. Ce nombre de Bingham est

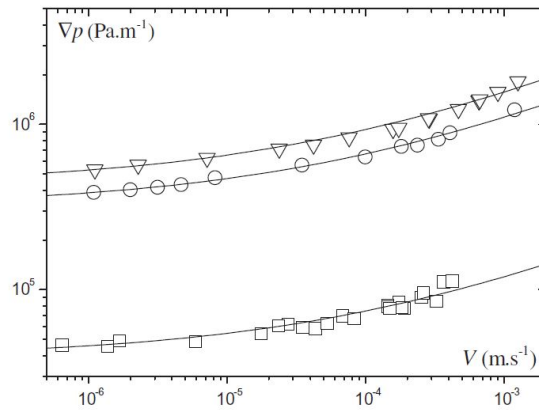


FIG. 2.3 – Courbes effectives d'écoulement dans un milieu poreux ($D = 2$ mm) et ajustement avec un modèle d'Herschel-Bulkley : solution de Carbopol avec $\tau_C = (\square)$ 8 Pa, (\circ) 55 Pa, (∇) 78 Pa [59].

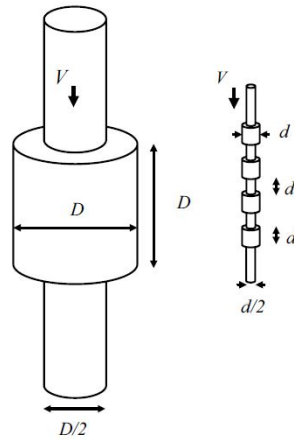


FIG. 2.4 – Géométrie des pores modèles étudiés à l'IRM : $D = 7$ cm et $d = 1$ cm [62].

généralisé pour l'écoulement dans les pores ou les milieux poreux par :

$$Bi = \frac{\tau_C}{(V/l)^n}, \quad (2.3)$$

où V est la vitesse débitante et l une longueur typique de cisaillement : $l = D/4$ ou $d/4$ pour les pores modèles et $l = D/6$ dans le cas des milieux poreux.

Seuls les grands pores $D = 7$ cm permettent une observation directe des champs de vitesses. Cette observation est faite à la figure 2.5.

Deux remarques peuvent être faites : une quantité importante de fluide est au repos et le champ de vitesse (mis à l'échelle de la vitesse maximale) a une allure quasi-identique quelque soit la vitesse débitante hormis pour la vitesse la plus importante, soit le nombre de Bingham Bi le plus faible.

Suite aux contraintes d'observation par RMN, seule une analyse statistique des champs de vitesses peut être effectuée pour les pores plus petits et les milieux poreux. Les résultats typiques de densités adimensionnées de vitesse sont ainsi présentés à la

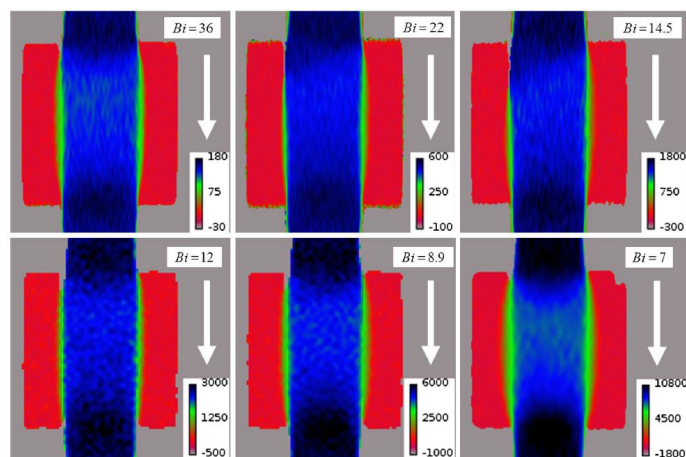


FIG. 2.5 – *Champ des normes de vitesse dans un plan longitudinal à l'écoulement dans le grand pore (Fig. 2.4) avec des vitesses moyennes croissantes (échelle des vitesses en micromètre par seconde) [62].*

figure 2.6 pour le gros pore et les petits pores modèles et à la figure 2.7 pour les milieux poreux.

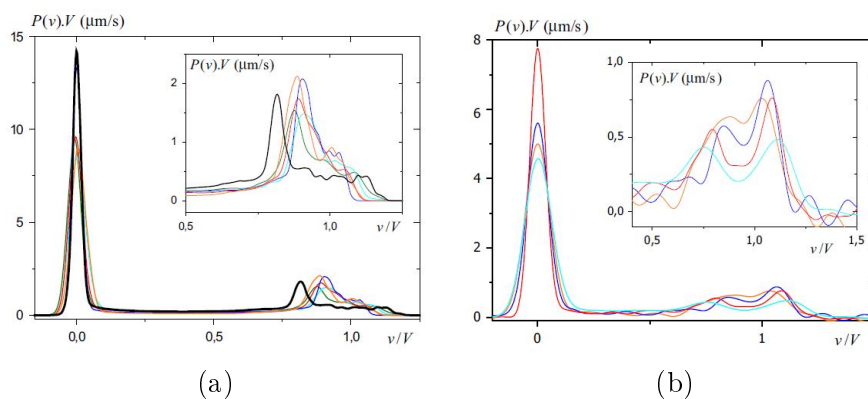


FIG. 2.6 – *Exemples de densités adimensionnées de vitesse longitudinale pour l'écoulement d'un fluide à seuil pour différents vitesses moyennes : (a) écoulement au travers d'un grand pore (7 cm), (b) écoulement au travers d'un petit pore (1 cm) [62].*

Nous n'analyserons pas dans les détails ces courbes mais en retiendrons les conclusions essentielles. Ainsi, les observations sur les pores modèles mettent en évidence que près de 60% du fluide est à l'arrêt pour des nombres de Bingham Bi supérieurs à 1. Cependant lorsque le nombre de Bingham diminue (donc que la vitesse débitante augmente), cette proportion de fluide à l'arrêt se réduit. Cela suggère que la région en mouvement s'étend dans la direction radiale à l'intérieur de la boîte ou, plus précisément, que la région cisailée est beaucoup plus épaisse à l'intérieur de la région en mouvement comme cela peut être observé la figure 2.5.

Les expériences d'injection en milieu poreux mettent en évidence qu'au contraire de ces pores modèles, moins de 10% du fluide est à l'arrêt : presque tout le fluide s'écoule

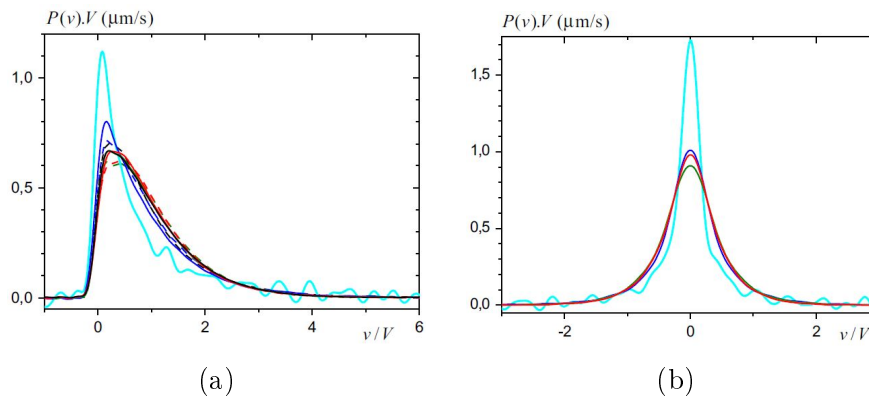


FIG. 2.7 – Exemples de densités adimensionnées de vitesse dans un milieu poreux constitué de billes collées ($D = 2$ mm pour les lignes pointillées, $D = 0,5$ mm pour les lignes pleines) pour l'écoulement d'un fluide à seuil pour différents vitesses moyennes : (a) vitesses longitudinales, (b) vitesses transversales [62].

dès que l'écoulement est initié. Ainsi, il n'y apparaît pas clairement de chemin préférentiel au niveau microscopique ce que l'équation 2.2 pouvait retranscrire sur un plan macroscopique.

2.3 Phénomènes de blocage et suffusion dans les sols grossiers

Le PN ERINOH a été une occasion spécifique de développer un modèle physique remarquable permettant d'étudier les écoulements dans les sols grossiers. Ce modèle est une conduite de 3 m de long et 18 cm de diamètre interne dans laquelle plusieurs phénomènes physiques ont pu être étudiés :

- blocage d'un écoulement d'eau dans un sol perméable au moyen de l'injection d'un coulis de bentonite ;
- développement et caractérisation des phénomènes de suffusion.

2.3.1 Blocage d'un écoulement d'eau dans les sols perméables par injection de coulis

Le principe de l'expérience, basée sur une approche de modélisation physique, est de générer, dans un premier temps, un écoulement permanent à travers un sol contenu dans une conduite et, dans un second temps, d'essayer de bloquer l'écoulement de l'eau par l'injection locale d'un coulis à un point donné le long du tuyau. L'objectif est ensuite d'analyser le processus d'injection du coulis et de comprendre les mécanismes possibles de blocage de l'écoulement de l'eau par le coulis avec d'importantes retombées pratiques potentielles [81].

Le schéma du dispositif d'essai est représenté à la figure 2.8 et une photographie est donnée à la figure 2.9. Les détails de l'instrumentation y figurent.

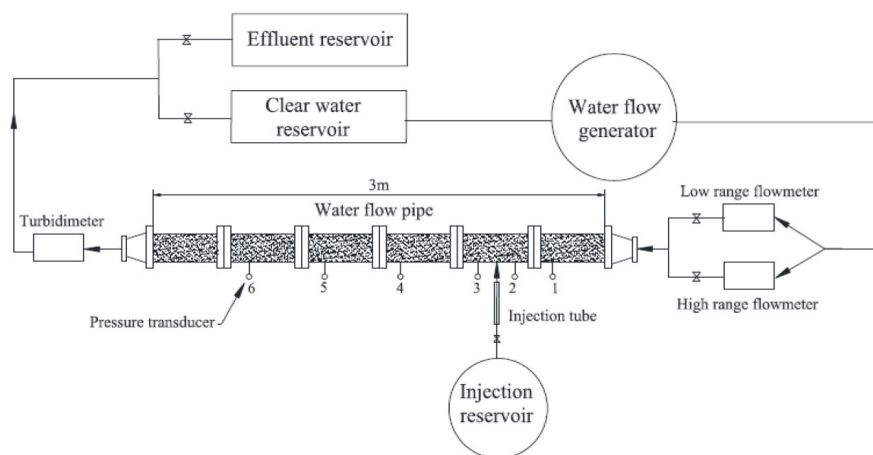


FIG. 2.8 – Schéma du dispositif d'essai de la grande conduite d'écoulement [142].

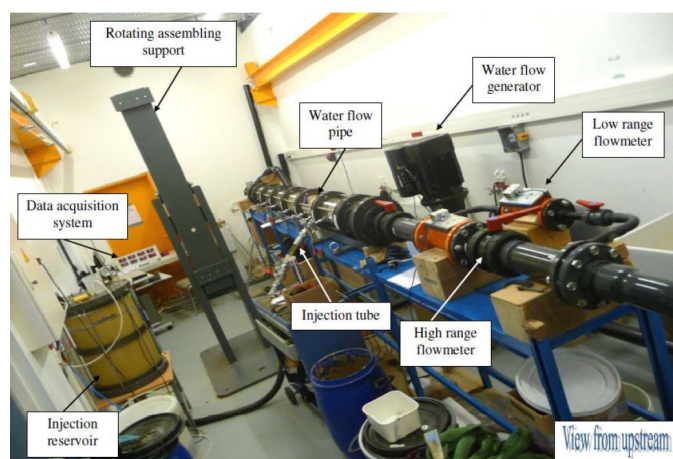


FIG. 2.9 – Photographie du dispositif d'essai de la grande conduite d'écoulement [142].

La conduite d'écoulement, d'une longueur de 3 m et d'un diamètre intérieur de 18 cm, est composée de six « éléments » ou « sections » en plexiglas, de 50 cm de long. À chaque extrémité, un module conique permet l'entrée ou la sortie de l'eau. Sur le deuxième élément, la conduite est équipée d'un raccord spécial permettant l'injection d'un coulis via un réservoir sous pression. La conduite est équipée de capteurs de pression permettant de contrôler la pression de l'eau pendant un essai. L'écoulement d'eau dans la conduite est généré par une pompe à pression contrôlée p_p de 10 à 1600 kPa. En fonction de la perméabilité du sol, la pompe peut ainsi fournir des débits d'eau allant jusqu'à $10 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$. Des débitmètres complètent ce dispositif.

La première étape d'un essai consiste à remplir la conduite avec le sol à tester, du gravier 4/10 : la conduite est assemblée en position verticale en ajoutant successivement les six éléments et en les remplissant progressivement. Cette procédure permet de reconstituer un matériau homogène bien contrôlé à un état de densité donné. Le support est ensuite tourné pour amener la conduite en position horizontale.

L'écoulement d'eau est par la suite établi dans la conduite. Cet écoulement est réalisé par palier croissant de pression p_p pour d'abord saturer la conduite puis évaluer la

perméabilité moyenne du sol contenu dans la conduite et enfin établir un écoulement à débit constant.

Le coulis à base de bentonite, préparé au préalable et versé dans le réservoir d'injection, est ensuite injecté à une pression constante et suffisamment élevée pour assurer une bonne injection du coulis dans le sol soumis à l'écoulement de l'eau. Pendant la phase d'injection, l'examen visuel de la conduite permet d'observer comment le coulis se propage à l'intérieur de celle-ci. L'injection est poursuivie jusqu'à ce qu'un blocage possible de l'écoulement de l'eau soit obtenu comme présenté à la figure 2.10.

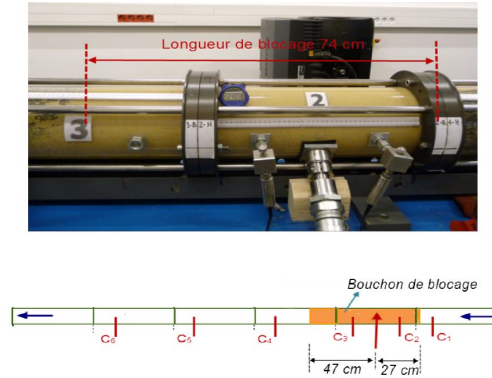
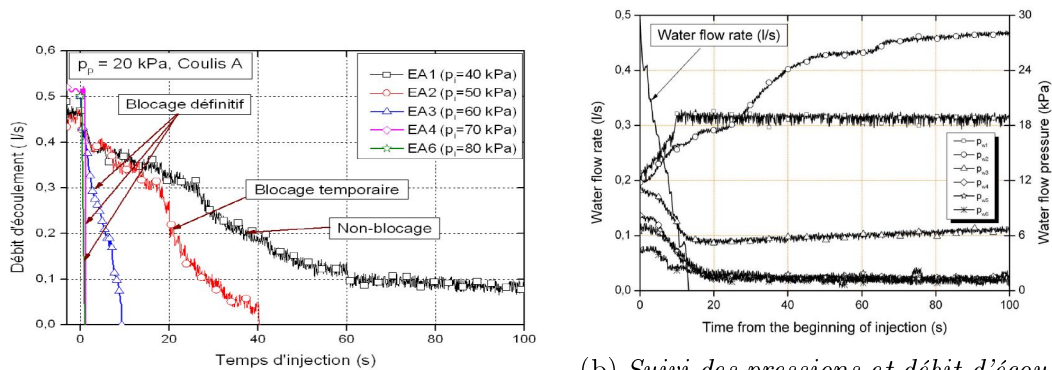


FIG. 2.10 – Exemple de bouchon de blocage [141].

La figure 2.11(a) présente le suivi des débits d'écoulement pour 5 essais avec une pression de pompe identique $p_p = 20$ kPa mais différentes pressions d'injection de coulis p_i conduisant à situations variées : blocage définitif, blocage temporaire ou non-blocage.

Les différents paramètres suivis au cours d'un essai sont représentés à la figure 2.11(b) : débit et pressions au niveau des différents capteurs.



(a) Suivi des débit d'écoulement pour 5 essais différents [141].

(b) Suivi des pressions et débit d'écoulement lors d'un essai de colmatage définitif [142].

FIG. 2.11 – Exemples de paramètres d'essais.

Dans le cadre de ces travaux et en lien avec la section précédente sur l'écoulement des fluides à seuil dans les milieux poreux, un modèle spécifique de colmatage a été élaboré. Il permet de rendre compte de la capacité, ou non, d'un bouchon d'injection à assurer un blocage de l'écoulement.

L'équilibre des forces sur un simple cylindre de rayon r et longueur L dans lequel se déroule un écoulement comme celui illustré précédemment à la figure 1.5(a) permet en effet d'établir :

$$\tau(r) = \frac{\Delta p \cdot r}{2L}, \quad (2.4)$$

où τ est la contrainte appliquée sur les parois du cylindre et Δp la différence de pression appliquée.

Une condition de blocage d'un fluide à seuil à l'intérieur de ce cylindre s'écrit donc comme $\tau(r) \leq \tau_C$, où τ_C est la contrainte seuil du fluide considéré. Cette relation est analogue à l'équation (2.2) avec $V = 0$.

Nous en déduisons ainsi la longueur minimale pour un blocage dans le cylindre considéré :

$$L_C = \frac{\Delta p \cdot r}{2\tau_C}. \quad (2.5)$$

Pour relier cette relation avec les résultats expérimentaux sur la condition de blocage de l'écoulement dans la conduite par un coulis injecté, il reste à connaître les paramètres rhéologiques du coulis (τ_C) et les relations permettant de modéliser le milieu poreux comme un ensemble de conduits cylindriques (rayons équivalents, tortuosité...) [45, 141]. Trois approches ont été menées et la plus satisfaisante (la « deuxième approche ») a été de considérer des conduits dont le rayon typique est celui situé entre 4 grains : $r = d_{50}(\sqrt{2} - 1)/2$ [141].

Les résultats typiques issus de cette analyse sont donnés aux figures 2.12 et 2.13 pour 2 coulis d'injection différents (type *A* ou *B*).

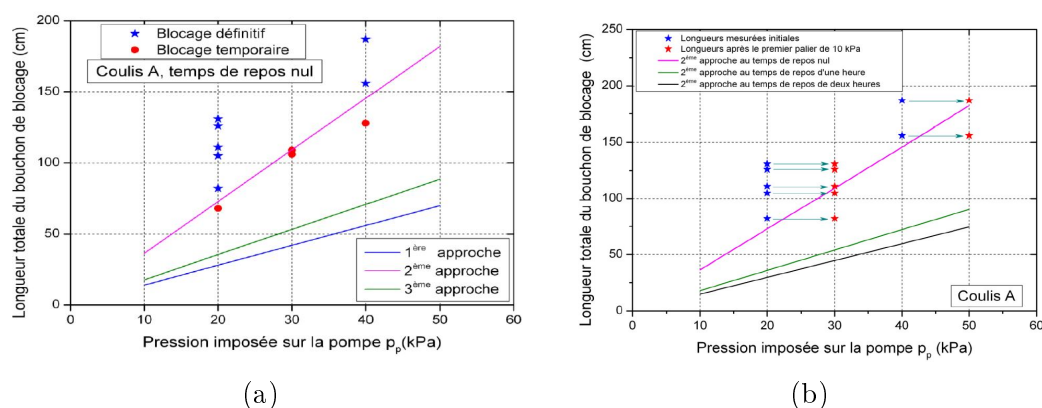


FIG. 2.12 – Résultats du modèle de blocage sur le coulis de type *A* : (a) placement des essais, (b) évolution lors d'une augmentation de la pression d'écoulement : décolmatage de tous les essais [141].

L'analyse de la longueur des bouchons de colmatage (et leur stabilité) en fonction de la pression imposée à la pompe (et supposée reportée entièrement sur le bouchon) est représentée aux figures 2.12(a) et 2.13(a). Un très bon accord est obtenu en particulier pour la définition d'une zone de transition (blocage temporaire).

Par ailleurs, en complément de ces résultats, une augmentation de 10 kPa de la pression de pompe p_p a été imposée aux essais de blocage définitif. Cela a, pour certains essais, provoqué des décolmatages comme indiqué sur les figures 2.12(b) et 2.13(b). Ces

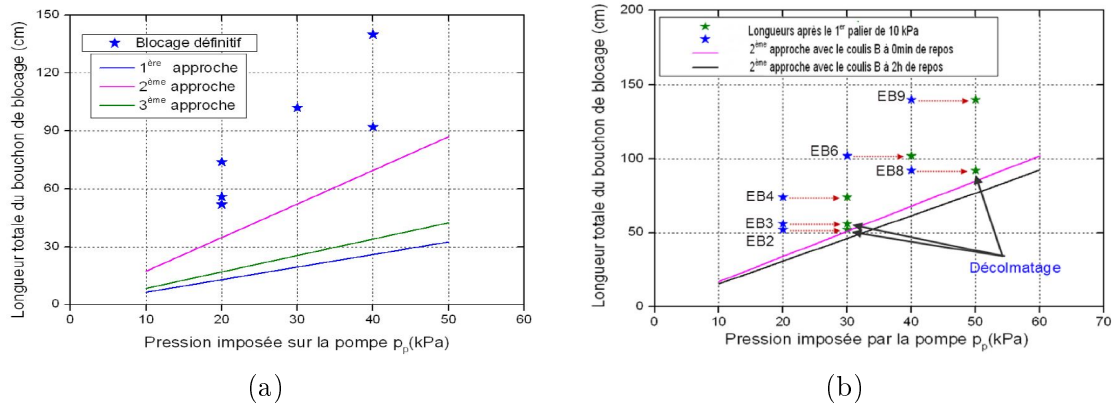


FIG. 2.13 – Résultats du modèle de blocage sur le coulis de type B : (a) placement des essais, (b) évolution lors d'une augmentation de la pression d'écoulement : décolmatage de certains essais [141].

décolmatages sont, de nouveau, en très bon accord avec le modèle de blocage défini à l'équation (2.5) montrant la pertinence de ce modèle.

2.3.2 Suffusion dans les graves et les sols grossiers

La grande conduite d'essais présentée dans la section précédente a été également utilisée, à la suite, pour effectuer des essais de suffusion [78]. La suffusion, phénomène d'érosion notamment présenté à la figure 1.2, correspond à l'érosion des particules les plus fines d'un milieu granulaire traversé par un écoulement.

Après une analyse expérimentale de la faisabilité des essais, la configuration retenue a été la conduite placée à la verticale avec 1 ou 2 modules et un écoulement descendant lors de l'essai.

Le schéma du dispositif d'essai, incluant les détails de l'instrumentation, est représenté à la figure 2.14 et deux photographies sont données à la figure 2.15.

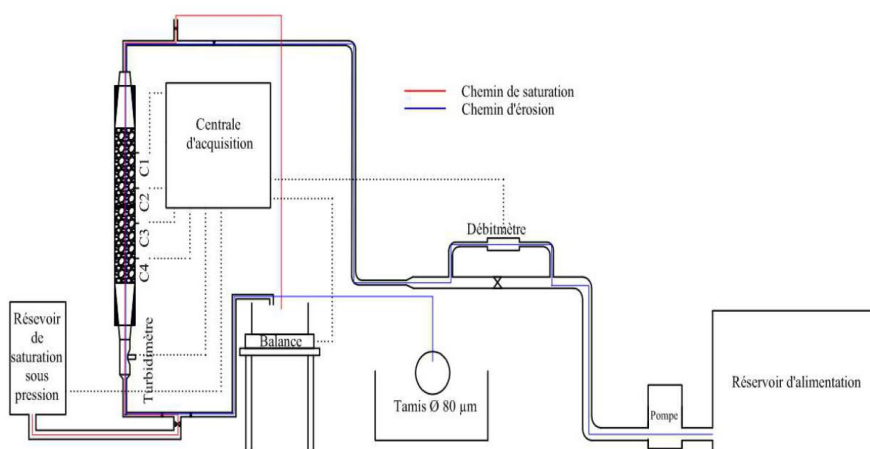


FIG. 2.14 – Schéma du dispositif d'essai de suffusion en configuration verticale [78].

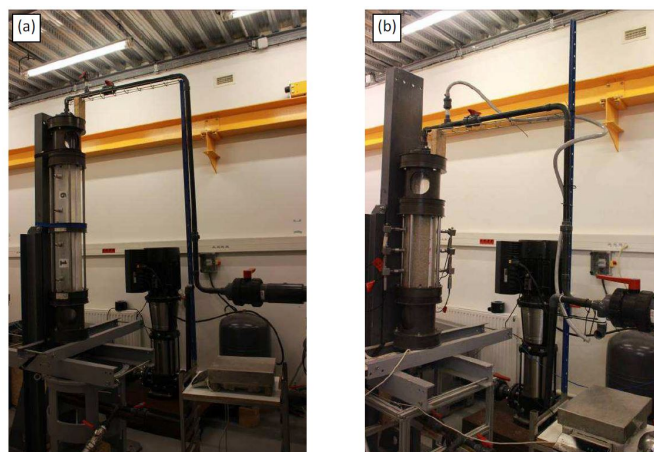


FIG. 2.15 – Photographies du dispositif d’essai de suffusion : (a) avec 2 modules, (b) avec 1 module [78].

Les matériaux étudiés ont été reconstitué à partir de 11 matériaux de référence : sols fins (argile kaolinite Speswhite, illite verte de Velay, sable broyé), sables d’Hostun (6 classes différentes) et graviers (2 classes).

Les expériences menées ont permis de s’intéresser au différents paramètres influant la sensibilité à la suffusion et son développement : forme de la courbe granulométrique, pression d’écoulement, nature et quantité des fines, densité... Une première analyse en lien avec les critères d’érodabilité existants a pu être faite à l’issue.

Concernant l’influence de la courbe granulométrique, la figure 2.16(a) présente celles des 7 mélanges (notés $S1$ à $S7$) dont les résultats d’essais sont détaillés à la suite. La classification de ces matériaux selon les critères de Wan et Fell [148] est donnée à la figure 2.16(b). En fonction de ce critère, le matériau $S1$ est classé comme stable, les matériaux $S2$ et $S6$ sont classés dans la zone de transition et les matériaux $S3$, $S4$, $S5$ et $S7$ sont classés comme instables.

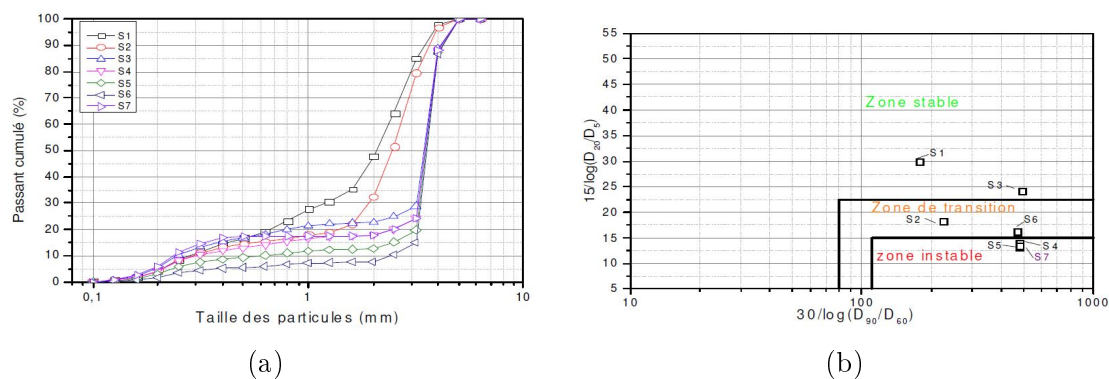


FIG. 2.16 – Matériaux testés dans les essais à pression constante : (a) courbes granulométriques, (b) classification de l’érodabilité selon le critère de Wan et Fell [78].

Les mélanges ont été mis en place dans la conduite à une masse volumique sèche des particules grossières constante et identique $\rho_{d_g} = 1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Par conséquent,

les matériaux contenant plus de particules fines ont une masse volumique totale plus élevée que celle des sols en contenant moins. Cela influence en conséquence les masses volumiques, les porosités, les perméabilités...

Les essais ont tous eu lieu en appliquant, après saturation, une pression de pompe p_p à 50 kPa durant 10 h au total. Pour caractériser l'initiation et l'évolution de la suffusion, plusieurs paramètres peuvent alors être suivis : pressions le long de la conduite, débit d'écoulement, masse des fines érodées, évolution des granulométries... A titre d'exemple, les figures 2.17(a) et (b) présentent respectivement le suivi des débits et masses érodées sur les 10 premières minutes avec des comportements assez différents.

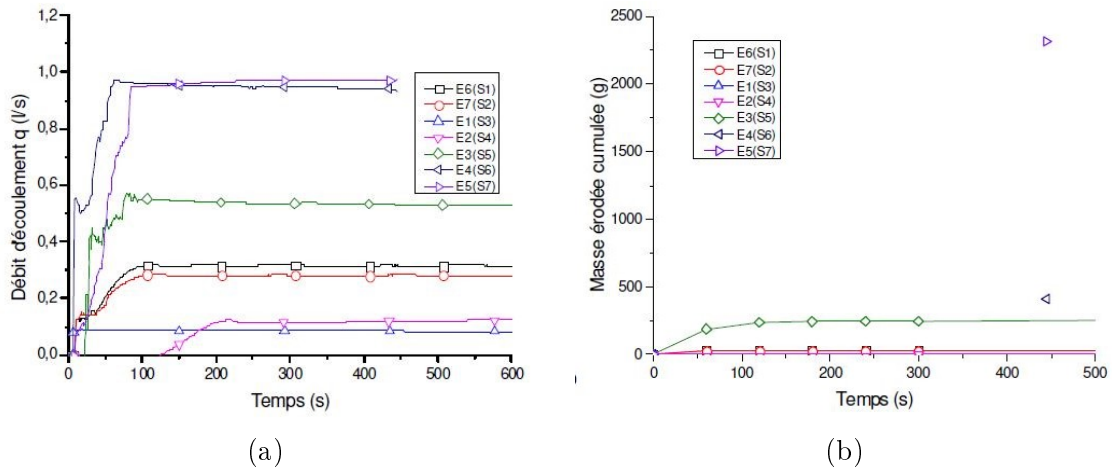


FIG. 2.17 – Suivi des paramètres pour les matériaux $S1$ à $S7$: (a) débit d'écoulement, (b) masses cumulées des particules fines érodées [78].

Une analyse typique des résultats des essais est donnée à la figure 2.18. Elle présente la proportion de particules fines érodées en fonction du pourcentage initial de ces fines dans le matériau.

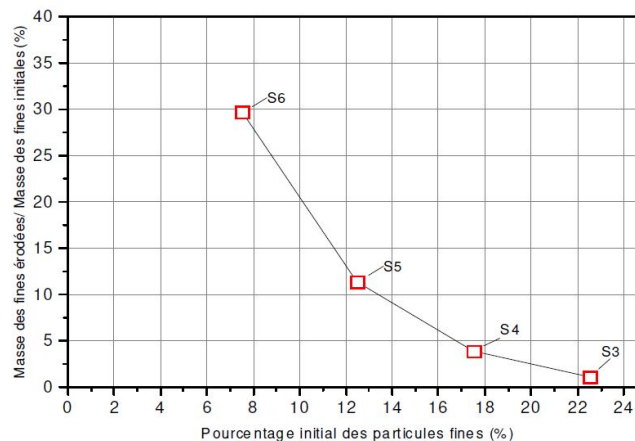


FIG. 2.18 – Évolution du rapport de la masse des fines érodées par rapport de la masse des fines initialement introduite en fonction du pourcentage initial de ces fines [78].

La proportion de particules fines érodées diminue avec l'augmentation de pourcentage des particules fines composant ces matériaux testés. Par exemple, pour le matériau *S3* contenant 22,5% de particules fines, seulement 1,5% de la masse initiale des particules fines a été érodée au bout de 10 h tandis que pour le matériau *S6* contenant 7,5% de particules fines, 25,7% de ces particules fines a été érodée au bout de 10 min seulement. Cette différence est due au taux de remplissage par les particules fines de l'espace poral disponible de la partie « grossière » gardée constante : plus il y a de particules fines dans la composition des matériaux testés, plus le volume de cet espace poral diminue et induit de ce fait une réduction du débit d'écoulement à gradient hydraulique constant (Fig. 2.17a) et une diminution de la capacité d'érosion et de transport [114, 128, 148].

2.4 Conclusion et perspectives de la thématique

Plusieurs aspects des écoulements complexes dans les milieux poreux, dont les sols, ont été abordés dans ce chapitre : écoulements de fluides complexes dans des situations modèles, injection de blocage d'écoulements parasites, phénomènes de suffusion...

Les travaux menés ont montré la nécessité, pour ces phénomènes, d'étudier à la fois les aspects microscopiques et macroscopiques en disposant de dispositifs expérimentaux adaptés.

C'est également le cas dans d'autres situations rencontrées en géotechnique comme, par exemple, dans le cadre de l'étude des structures géotechniques équipées d'échangeurs de chaleur [5, 117].

Des travaux en cours cherchent ainsi à modéliser les différents types de transfert et transport de chaleur aux voisinages de ces structures notamment à l'aide de modélisation en centrifugeuse géotechnique. Cela nécessite, en amont, de bien comprendre les lois d'échelle relatives à ces phénomènes comme cela peut être illustré à la figure 2.19 sur laquelle un pieux géothermique est représenté dans son environnement.

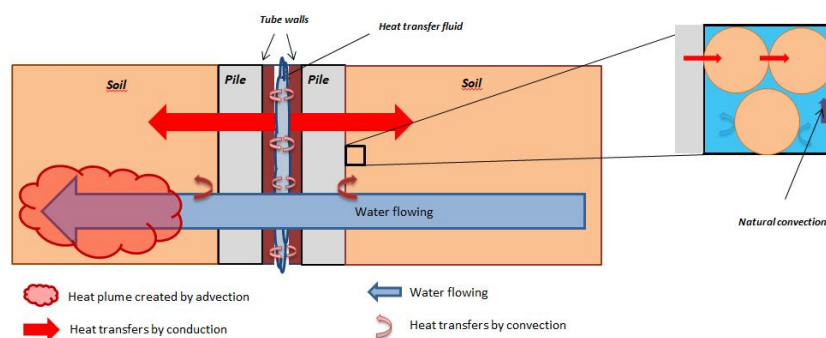


FIG. 2.19 – Schéma des phénomènes thermiques impliqués dans le fonctionnement d'un pieux géothermique [117].

Soulignons que, dans ces situations, comme dans celles étudiées dans ce manuscrit, une approche multiphysique et multiéchelle est nécessaire.

Chapitre 3

Caractérisation et suivi des sites affouillables

3.1 Contexte, enjeux et démarche

Les processus d'affouillement sont une cause importante d'instabilité et de destruction des ouvrages (ponts, ouvrages en terre et bâtiments) notamment lors des crues majeures. Dans un écoulement, les phénomènes d'érosion et de transport des sédiments sont en effet accentués par la présence d'obstacles tels que les piles ou les culées de ponts. Les fosses d'érosion ainsi formées sous l'effet de forces hydrodynamiques intermittentes ou continues [29, 111] peuvent menacer la structure en réduisant par exemple la capacité portante des fondations et conduire à sa ruine. Les mécanismes impliqués dans ce processus érosif sont cependant très difficiles à évaluer, surtout à l'échelle réelle parce qu'ils sont particulièrement complexes et font intervenir de nombreux champs disciplinaires (mécanique des sols, des fluides, des structures...). Deux besoins se font particulièrement sentir [138] :

- besoin d'expériences et de modèles notamment hydrauliques en laboratoire pour améliorer la compréhension des processus d'affouillement au droit des structures ;
- besoin d'études et de dispositifs *in situ* pour caractériser les phénomènes d'affouillement, évaluer les incertitudes de mesure et calibrer les modèles.

Sur un plan pratique, en France, au cours des 45 dernières années (depuis l'effondrement du pont Wilson en 1978), la politique de surveillance et de maintenance préventive et corrective des ouvrages ferroviaires et routiers a progressivement été renforcée [130, 131]. Ils bénéficient ainsi d'un suivi de leur état de santé structurel par leurs gestionnaires, généralement par des inspections exceptionnelles ou périodiques à des fréquences variables selon les types d'ouvrages et leurs importances. Ces inspections sont le plus souvent visuelles, parfois subaquatiques et/ou associées à des reconnaissances spécifiques (géotechniques, géophysiques, bathymétriques...). De nombreuses questions restent cependant d'actualité : classification robuste et multi-critère des ouvrages, surveillance en continu (pour les ouvrages à haut risque), mise au point de maintenance prédictive...

Les travaux présentés dans ce chapitre ont débuté dans le cadre de l'opération de recherche DOFEAS « Dignes et Ouvrages Fluviaux : Erosion, Affouillements et Séismes » de 2010 à 2014, décrite en introduction du chapitre 1 et qui comprenait une partie dédiée à l'étude des affouillements notamment par retours d'expérience.

Ces travaux ont été ensuite principalement menés dans le cadre, ou en rapport, avec le projet ANR SSHEAR "Soils, Structures and Hydraulics : Expertise and Applied Research" [53] que j'ai piloté entre 2014 et 2019. Ce projet impliquait 6 partenaires : l'Ifsttar (départements GERS, MAST et COSYS), le Cerema (Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV) avec ENPC et EDF R&D, LR de Blois et LR d'Aix en Provence), l'UMR FAST, Cofiroute, SNCF Réseau et l'IRT Railenium. Il s'est articulé autour de 3 tâches scientifiques et techniques comme décrit à la figure 3.1.

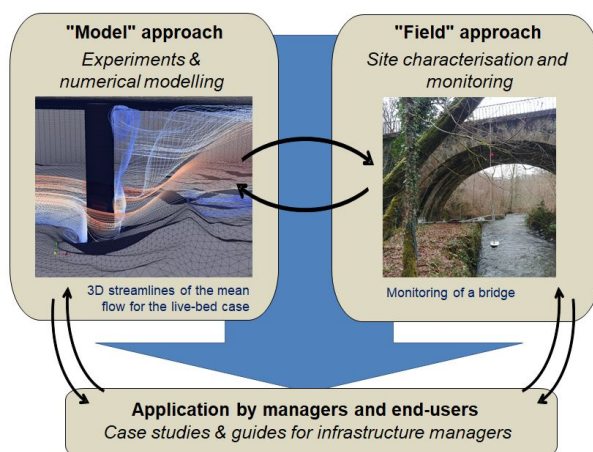


FIG. 3.1 – Structuration du projet ANR SSHEAR [53].

L'approche « Modèles » a comporté 2 volets, expérimental et numérique, visant à améliorer la compréhension des processus d'affouillement. Dans ce cadre, des expérimentations de laboratoires à plusieurs échelles (canaux de 10 cm à 2 m de large) ont été entreprises et une modélisation numérique tridimensionnelle innovante a été développée et validée. L'approche « Terrain » a eu pour objectif de développer des outils et méthodes pour une meilleure caractérisation et un meilleur suivi des sites vis-à-vis des affouillements. Une étape inédite est la mise en place, à demeure, de dispositifs complets de suivi en continu des affouillements sur 2 ponts. Ce suivi permet de suivre les affouillements de la sollicitation (caractérisation de l'écoulement) à la réaction (érosion/dépôt des sédiments). Enfin, la phase d'« Appropriation » par les gestionnaires et praticiens a permis de faire un état des lieux complet sur le traitement de la problématique par les gestionnaires et d'aboutir à la préparation d'un guide pour objectiver et prioriser les pratiques visant à assurer la disponibilité et la régularité des offres de transports.

Dans le contexte du projet ANR SSHEAR, j'ai notamment pu encadrer ou contribuer aux travaux de thèse de Nissrine Boujia [22], co-encadrée avec le département MAST et le LHSV, d'ingénieur d'étude d'Ousseynou Ndoye [115] et de post-doc d'Emma Florens [80], avec l'IRT Railenium. Les efforts d'étude et de recherche se sont poursuivis dans le cadre des travaux de thèses de Mohamed Belmokhtar [11], co-encadrée avec le département MAST, et de Tianyu Wang en CIFRE avec SNCF Réseau. Des travaux sur la résilience des réseaux de transport ont également été menés dans le cadre du projet européen PANOPTIS et des post-docs de Silvia Ientile [98] et Mezgeen Rasol [124]. Une collaboration active de recherche est également en cours avec le Japon : RTRI (Railway Technical Research Institute) et Université de Tokyo [139, 153].

Dans ce chapitre, je présenterai différents aspects de ces travaux avec une approche multi-échelle et observationnelle. J'aborderai, dans un premier temps, la question des interfaces eau-sédiments avec une double approche caractérisation et suivi sur site. Dans un deuxième temps, je traiterai de la caractérisation des interactions sols-structures en situations modèles pour une application aux affouillements. J'en viendrai, dans une troisième partie, au suivi et à la catégorisation des ouvrages affouillables. Je conclurai sur un rapide bilan et les perspectives de la thématique.

3.2 Caractérisation des interfaces eau-sédiments

L'état des sols aux pieds des ouvrages affouillables i.e. au niveau de leurs fondations est un point critique pour leur stabilité car la perte de portance des fondations liée au départ du sol en place peut entraîner un affaissement ou une défaillance plus importante de la structure. Afin de mieux caractériser ces sols/sédiments et leurs interactions avec l'hydraulique au voisinage des structures, deux approches complémentaires ont été menées.

La première approche adresse la question de la caractérisation de la sensibilité des sols et sédiments à l'érosion avec le développement d'essais dédiés. C'est donc une approche qui s'intéresse aux temps courts et où la sollicitation (hydraulique) est très localisée et provoquée/générée. Les applications des résultats potentiels de cette approche concernent typiquement des paramètres d'entrée pour des modélisations numériques ou bien des analyses de risque.

La seconde approche consiste au suivi en continu des sites et de l'état d'affouillement. Nous sommes donc sur des temps d'observation longs (plusieurs mois) et sur des échelles spatiales plus grandes (typiquement plurimétriques contre centimétriques) que l'approche précédente. Les applications des résultats potentiels de cette approche concernent la compréhension des phénomènes et le développement de systèmes de suivi de dégradations ou d'alertes.

3.2.1 Développements d'essais pour une meilleure caractérisation des sédiments érodables

Ces développements d'essais s'inscrivent dans la continuité des travaux menés sur la caractérisation de la sensibilité à l'érosion des géomatériaux (section 1.2). Comme nous avons pu l'y étudier, les différents essais proposés (dans ce manuscrit comme par d'autres auteurs) n'ont généralement pas des résultats facilement corrélables en particulier lors de comparaison entre essais en laboratoire et essais *in situ*. Par ailleurs, ces essais ne peuvent pas être utilisés dans des conditions immergées. La meilleure façon d'étudier l'érodabilité des sédiments reste donc d'effectuer des mesures directes *in situ*, sous l'eau, mais peu de développements existent à ce sujet [99].

Pour surmonter ces limites, nous avons entrepris de développer de nouveaux essais répondant à certaines contraintes :

- essais d'érosion praticables en conditions immergées (environ 1 m d'eau dans un premier temps) ;
- sollicitations (écoulement généré) « réalistes » c'est à dire principalement tangentielles à l'interface ;

- sollicitations ajustables pour travailler à différentes gammes de contraintes (sous, autour, au delà de seuils d'érosion) ;
- possibilité de suivre voire de mesurer la réponse des sédiments pour discriminer des comportements différents de matériaux ;
- des essais et un protocole « simples », robustes et répétables.

Deux essais ont ainsi été développés : l'essai d'érosion à roue (WET - "Wheel Erosion Test") et l'essai d'érosion à pompe (PumpET - "Pump Erosion Test"). Le principe de ces essais et le respect des contraintes énoncées ci-avant ont pu être validés en milieu contrôlé ou sur site. Ils restent cependant en développement et nécessitent encore des travaux. Je les présenterai donc de manière plutôt succincte par la suite.

Essai d'érosion à roue - WET

Le dispositif d'essai d'érosion à roue ou WET (pour "Wheel Erosion Test") est représenté à la figure 3.2. L'essai consiste à provoquer un écoulement d'eau à la surface de sédiments submergés à l'aide d'une roue tournant autour d'un axe horizontal. Dans sa version initiale, l'essai a été conçu pour être utilisé dans un aquarium. La roue (diamètre 10 cm, largeur 13 cm), placée initialement à une hauteur H au dessus d'un lit sédimentaire horizontal est mise en rotation à une vitesse constante caractérisée par la vitesse à la périphérie de la roue V_r [115]. Différents systèmes mécaniques permettent, grâce à un SONAR, de faire un relevé de la surface sédimentaire pour caractériser l'érosion induite (Fig. 3.3).

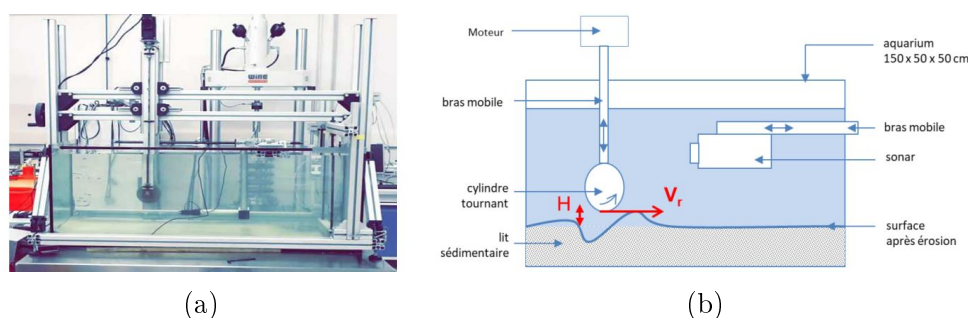


FIG. 3.2 – Dispositif d'essais WET : (a) photographie, (b) schéma.

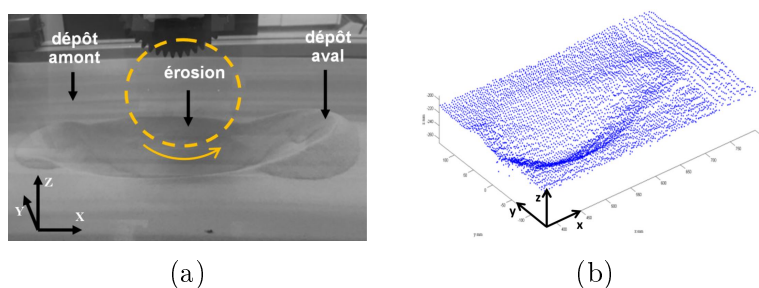
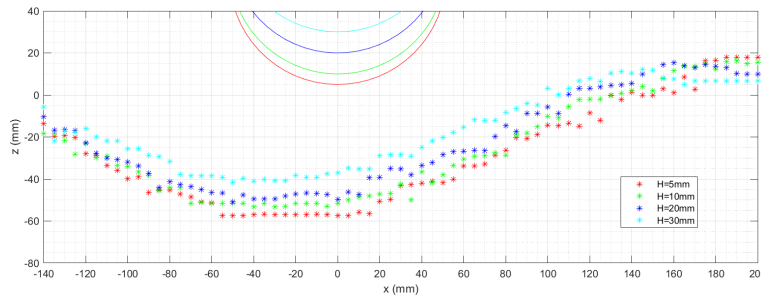
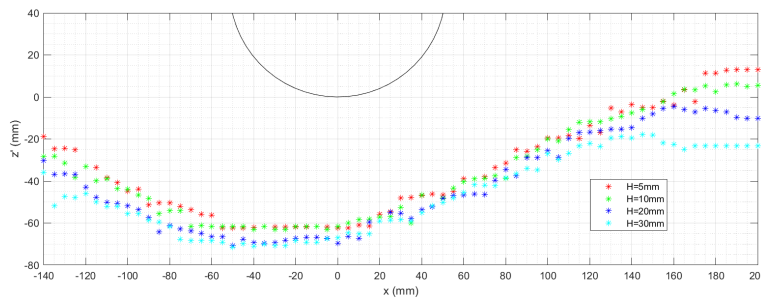


FIG. 3.3 – Fosse d'affouillement typique après essai WET : (a) photographie (position indicative et sens de rotation de la roue en jaune), (b) relevés SONAR.

Des études paramétriques ont pu être menées pour valider l'essai. Les valeurs typiques utilisées ont été entre 5 et 30 mm pour H et entre 0,31 et 1,24 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour V_r . Des résultats typiques d'essais sont ainsi présentés à la figure 3.4. Ils ont été réalisés sur un sable fin de Bourron-Marlotte ($D_{50} = 168 \mu\text{m}$) et montrent les profils longitudinaux obtenus en faisant tourner la roue à une vitesse V_r de 1,24 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pendant 40 min permettant d'approcher les profils finaux (i.e. lorsqu'il n'y a plus d'érosion). L'écoulement généré est de la gauche vers la droite (sens des x croissants). Le plan du profil est perpendiculaire à l'axe de rotation de la roue et situé au milieu de sa largeur.



(a) Profils dans le repère du laboratoire ($z = 0$: niveau initial des sédiments).



(b) Profils par rapport à la position de la roue ($z' = 0$: bas de la roue).

FIG. 3.4 – Profils longitudinaux finaux des sédiments pour différentes hauteurs de roue H et une vitesse de roue de $V_r = 1,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La figure 3.4(a) présente ces résultats dans le repère du laboratoire. Y sont affichés les 4 positions de roue différentes et les profils finaux des essais (le niveau étant initialement horizontal et à une hauteur $z = 0$ pour tous les essais). L'écoulement génère une fosse d'érosion dont le point bas est situé en amont de la roue et une zone de dépôt importante en aval. La position amont du point bas de la fosse d'érosion s'explique par les phénomènes liés à la gravité (réduite) et aux conditions alors plus favorables d'érosion en pente descendante qu'en pente montante.

De manière évidente une roue plus proche du niveau initial des sédiments génère une érosion plus importante. Une observation importante faite sur ces essais est cependant la possibilité de replacer les résultats par rapport à la position de la roue comme présenté à la figure 3.4(b). Dans cette situation, les profils se rapprochent laissant la possibilité d'analyser les résultats en régime permanent en tant que « profil final unique » par rapport à la roue (pour un sol et une vitesse de roue V_r donnés). La poursuite des travaux nécessite d'introduire des modèles numériques ou empiriques permettant de remonter d'une caractérisation de l'écoulement à une contrainte seuil sur l'interface.

Essai d'érosion à pompe - PumpET

Le dispositif d'essai d'érosion à pompe ou PumpET (pour "Pump Erosion Test") est représenté à la figure 3.5. L'essai, complètement immergé, consiste à provoquer un écoulement d'eau à l'aide d'une pompe dans un canal de mesure centimétrique directement placé au dessus de sédiments. Le canal n'a pas de fond et repose donc directement sur les sédiments. Il présente une section lentement variable (réduction d'un facteur 2 entre l'entrée et la sortie) permettant une augmentation de la vitesse moyenne (et donc de la contrainte appliquée à l'interface) le long du canal [106]. Une caméra située au dessus du canal d'écoulement permet de suivre la mise en mouvement des sédiments. Ce dispositif présente de nombreux avantages : léger, peu coûteux (moins de 1000 euros hors main d'œuvre) et pouvant être facilement mis en œuvre par une petite équipe.

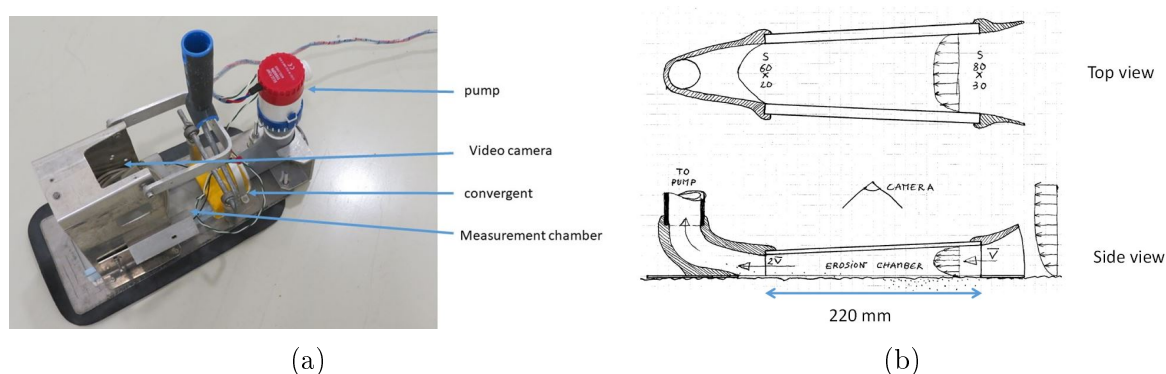


FIG. 3.5 – Dispositif d'essais PumpET : (a) photographie, (b) schéma [106].

Plusieurs essais de terrain ont eu lieu en août 2022. Cela a notamment permis de tester le dispositif dans différentes situations sur des sables plus ou moins grossiers (D_{50} de 700 à 1200 μm) sur la Loire ou ses affluents comme présenté à la figure 3.6.

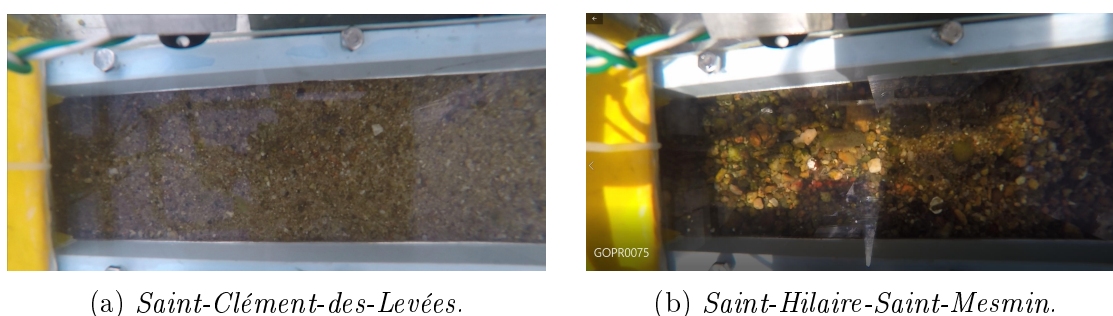


FIG. 3.6 – Vue des sédiments dans la chambre d'érosion du PumpET sur deux sites [106].

Même si les infos recueillies pour le moment sont très simples (seuil en vitesses de mise en mouvement des grains et estimation du flux sédimentaire-transport plus ou moins important), différents projets d'amélioration sont à l'étude : contrôle de la vitesse (et non plus seulement de la puissance appliquée à la pompe), mesure de la turbidité des effluents (pour estimer la quantité de sédiments érodés), suivi par nappe laser du

niveau des sédiments... La mise en œuvre nécessite cependant la prise en compte de la faisabilité de telles mesures et de la masse et de l'encombrement des capteurs.

3.2.2 Suivi en continu des affouillements

Dans l'objectif de mieux contrôler les risques liés aux affouillements, de nombreux systèmes de surveillance ont été développés, basés sur des dispositifs intrusifs ou non et des mesures directes ou indirectes, ponctuelles ou en continu, fixes ou mobiles (...), par l'utilisation de technologies variées (électrique, électromagnétique, acoustique, magnétique, fibre optique...) [27, 122, 149]. La plupart de ces systèmes de surveillance ne se concentrent que sur l'aspect bathymétrique (profondeur de la fosse) du problème de l'affouillement mais sans le corrélérer aux conditions d'écoulement.

Pourtant les phénomènes d'érosion et d'affouillement couplent fortement la dynamique hydraulique (hauteur, vitesses...), la surface (le massif) sédimentaire et la structure dans l'écoulement au travers de processus non linéaires : seuil d'érosion, transport, déposition... Ne s'intéresser qu'à la profondeur de la fosse (le niveau sédimentaire) ou à la hauteur d'eau ne permet donc pas de rendre compte de l'ensemble des phénomènes sur site. Il reste donc un réel manque d'expériences de terrain sur le suivi en continu de l'écoulement et de la bathymétrie.

Pour mieux comprendre les phénomènes d'affouillements, des suivis en continu sur ouvrages ont donc été envisagés, réalisés et utilisés dans le cadre du projet ANR SSHEAR. Dans le détail, à partir d'une étude sur les bases de données des partenaires gestionnaires, 7 sites d'étude ont été retenus avec un objectif de représentativité [129]. Des essais de reconnaissance classiques et des techniques complémentaires ont été menés pour une meilleure caractérisation des affouillements. Ces travaux ont permis d'aboutir au suivi détaillé de 3 sites pilotes : viaducs autoroutiers A71 sur la Loire à Orléans (piles dans le lit d'un cours d'eau), berge de St Loup sur l'Allier et ponts rails type voûte maçonnée à Isle sur l'Aurence (87). Deux de ces sites (ponts au-dessus de la Loire et de l'Aurence) ont été également retenus pour la mise en place d'instrumentations à demeure. Un cahier des charges pour l'instrumentation a ensuite été établi [80] conduisant au développement de 2 solutions spécifiques d'instrumentation [104] permettant de suivre en continu les paramètres clefs de la compréhension des phénomènes d'affouillement : bathymétrie (niveau des sédiments) et profils de vitesses (2D ou 3D).

Suivi du site du pont rail au dessus de l'Aurence

Le premier site à avoir été instrumenté a été celui du pont rail SNCF sur l'Aurence à Isle à proximité de Limoges (87). C'est un ouvrage maçonné en arche caractéristique du réseau ferré secondaire situé sur la ligne Limoges-Angoulême (Fig. 3.7). Ce site est affecté par un affouillement à proximité de la culée gauche. Le perré maçonné est partiellement effondré et de nombreux blocs dans le lit de la rivière en proviennent. Au pied de la culée, un affouillement de 1,7 m de long et 0,5 m de profondeur a été mesuré. Une campagne bathymétrique par le Cerema/LR Blois a confirmé qu'une zone érodée existe sous le pont avec une partie encore plus profonde à l'extrados du cours d'eau (Fig. 3.8). Il a été décidé d'implanter les capteurs sur cette zone.

Le dispositif autonome et complet est présenté aux figures 3.9 et 3.10. Il est composé de :

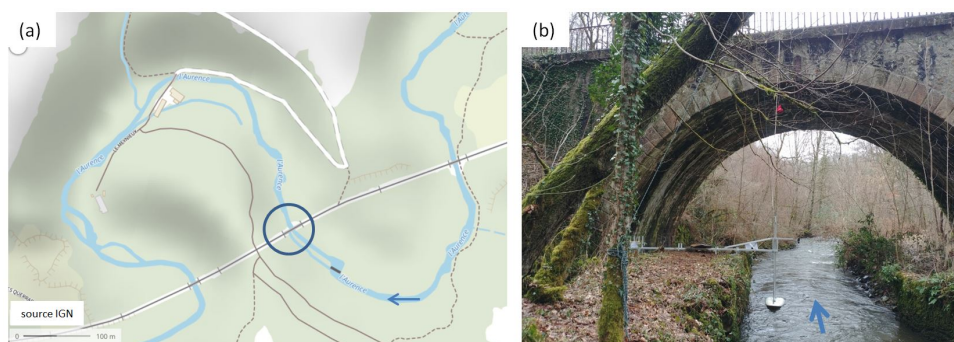


FIG. 3.7 – Site instrumenté du pont rail SNCF sur l'Aurence à Isle à proximité de Limoges : (a) situation, (b) photographie.

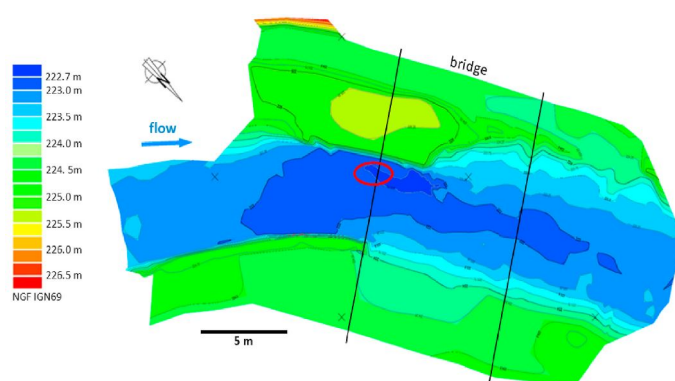


FIG. 3.8 – Relevé bathymétrique réalisé en mai 2018. Cercle rouge : emplacement du dispositif de surveillance dans la zone d'érosion maximale.

- un limnimètre Ijinus pour mesurer de le niveau d'eau ;
- un profilomètre à ultrasons Ub-flow d'Ubertone monté sur une planche mobile verticalement pour mesurer le profil de vitesses et la profondeur d'eau ;
- une caméra pour surveiller le dispositif d'essai ;
- un boîtier d'acquisition et de transmission alimenté par 2 panneaux solaires.

Les acquisitions ont lieu toutes les 5 minutes. Les détails techniques sont donnés par Larrarte *et al.* [104]. Le profilomètre Ub-flow est notamment équipé de 2 transducteurs permettant une reconstruction d'un profil 2D de vitesses. Il est à souligner, également, que les contraintes techniques de tels appareils (profondeur d'investigation, limite de Nyquist sur les mesure de vitesses par effet Doppler, zone "morte"...) impliquent un certain nombre de choix et de traitements numériques [51, 104] qui ne seront pas détaillés ici.

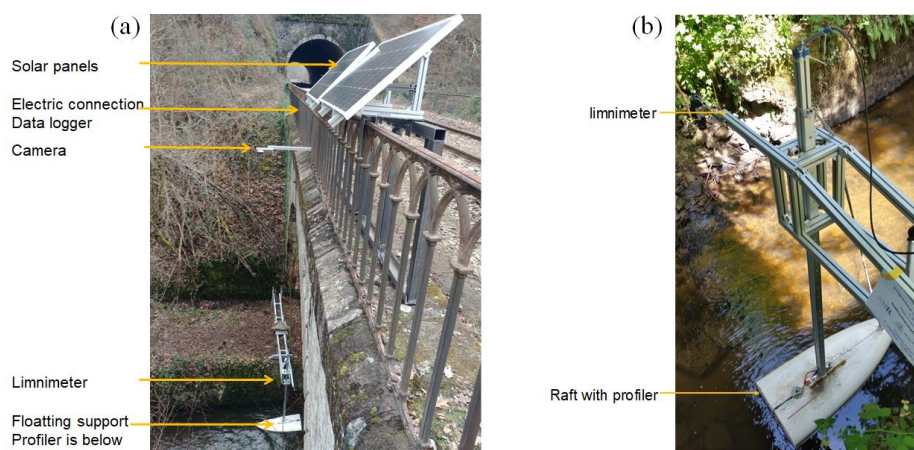


FIG. 3.9 – Dispositif d'instrumentation du pont rail SNCF sur l'Aurence à Isle à proximité de Limoges : (a) vue générale, (b) détail du radeau [104].

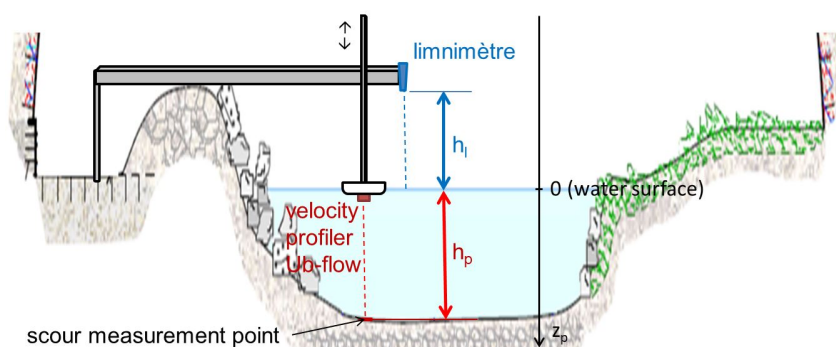


FIG. 3.10 – Schéma en coupe de l'instrumentation [104].

Suivi des hauteurs d'eau et de sédiments

La figure 3.11 montre les résultats de niveau d'eau h_w ¹ obtenus sur les 9 mois avec le limnimètre. Ils sont en très bon accord avec les données de la station de mesures hydro-métriques de la banque Hydro² située environ 2 km en amont. Nous pouvons également observer un très bon accord entre la pluviométrie du site et les niveaux d'eau observés : l'Aurence est un petit cours d'eau très réactif.

L'exploitation des mesures de l'Ub-flow a porté à la fois sur la mesure de la hauteur d'eau h_p (voir figure 3.10) et la mesure du profil de vitesses. La figure 3.12(a) présente, en fonction du temps, le profil de l'intensité du signal rétrodiffusé à une certaine distance de la surface, sur 2 semaines de suivi à partir du 21 juin 2019. Les hautes valeurs indiquant la présence d'un obstacle (d'une surface fortement rétro-diffusante en pratique), le premier pic d'intensité est caractéristique de la présence du fond. Un traitement numérique (sous Python) permet alors d'extraire h_p en fonction du temps. La figure 3.12(b) permet alors

1. Ce niveau (ou hauteur) est défini à une constante près. Cette constante a été choisie de telle sorte que, au démarrage du suivi, le niveau d'eau soit égal à la hauteur d'eau mesurée par le profilomètre Ub-flow.

2. <https://hydro.eaufrance.fr>.

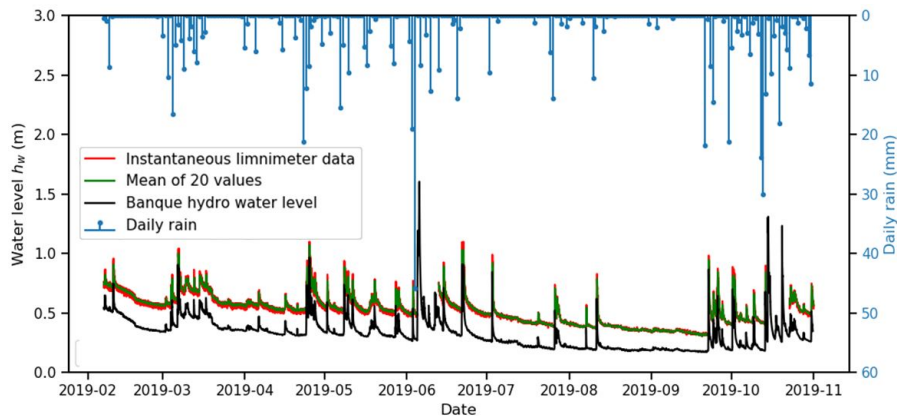


FIG. 3.11 – Suivi des niveaux d'eau et pluviométrie sur 9 mois [104].

la comparaison entre ces mesures de hauteurs d'eau h_p obtenues avec le profilomètre Ub-flow (une bathymétrie en 1 point) et les niveaux d'eau notés h_w ou h_l obtenus avec le limnimètre. Une différence d'évolution entre ces 2 valeurs signalerait une évolution du niveau des sédiments et donc serait caractéristique de phénomènes d'érosion ou de dépôt. Cela est confirmé par la figure 3.13 où les données de la figure 3.12(a) sont replacées dans le repère fixe du site : les hautes valeurs de signal rétrodiffusé restent situées au même niveau (notamment $z = 0$ m, correspondant au fond). Aucune différence significative (plus grande que de l'ordre d'un centimètre) et donc aucune érosion n'ont été observées sur les 9 mois de l'étude.

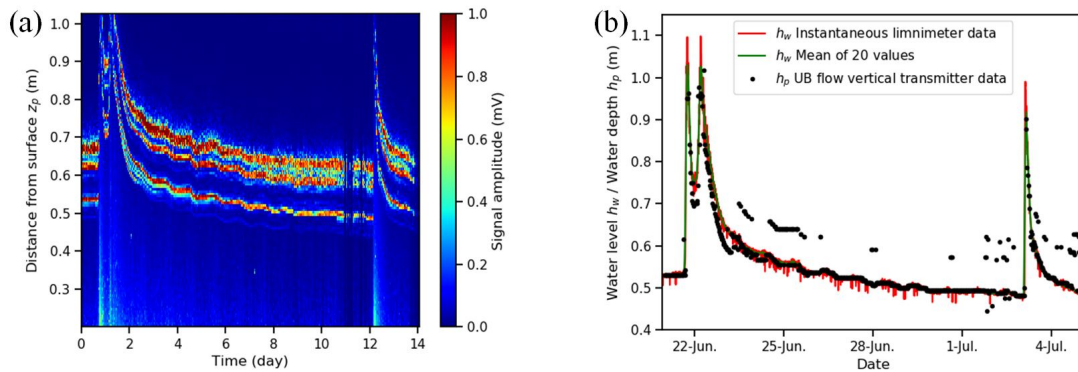


FIG. 3.12 – Suivi temporel de la hauteur d'eau : (a) évolution du profil d'amplitude du signal rétrodiffusé de l'Ub-flow à partir du 21 juin 2019, (b) mesures limnimétriques (niveau d'eau h_w) et résultats de l'analyse numérique du signal de l'Ub-flow (profondeur d'eau h_p) [104].

Caractérisation du champ de vitesse

Plusieurs données relatives à la vitesse sont enregistrées par l'Ub-flow selon différentes configurations (vitesse maximale, profondeur d'investigation, moyenne...). Une des configuration (numérotée "2") permet notamment d'avoir le profil de vitesses moyennées à

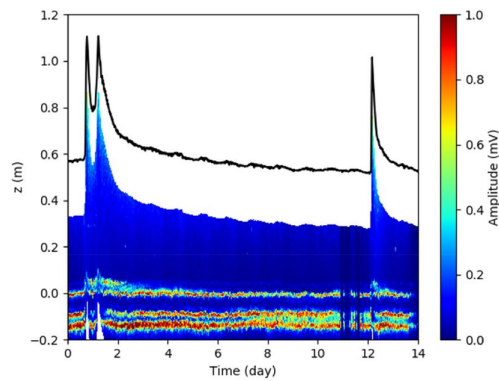


FIG. 3.13 – Evolution du profil d'amplitude du signal rétrodiffusé de l'Ub-flow à partir du 21 juin 2019 dans le repère fixe du site. La courbe noire représente la position de la surface libre [51].

proximité du capteur et d'en déduire la vitesse caractéristique de proche surface notée U_{2c} . La figure 3.14 présente une analyse statistique (moyenne et écart-type) de cette vitesse en fonction du niveau d'eau h_l relevé par le limnimètre pour différentes périodes de temps représentatives des 9 mois de mesures.

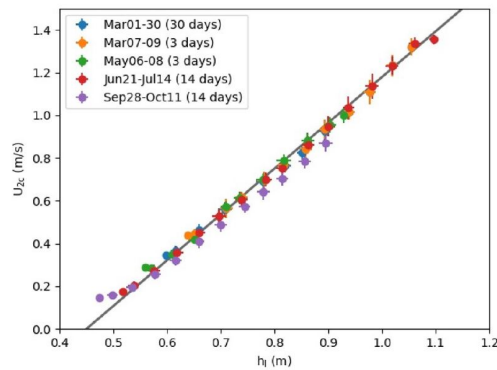


FIG. 3.14 – Grandeurs caractéristiques de l'écoulement pour différentes périodes : vitesse caractéristique U_{2c} en fonction du niveau d'eau h_l relevé par le limnimètre [51].

Il peut être observé une relative indépendance des données expérimentales en fonction de la période considérée. Par ailleurs, il n'a pas été relevé d'hystérésis dans cette mesure [51]. La figure 3.14 peut donc être considérée comme analogue à une « courbe de tarage » de l'écoulement au niveau du point de mesure.

La figure 3.15 présente, en fonction du temps et pour 2 périodes, le profil de vitesses *instantanées* (composante horizontale dans le plan de l'Ub-flow) obtenu à partir d'une autre configuration de l'Ub-flow. Ce profil est issu d'un prétraitement numérique sous Python permettant de redresser les signaux soumis aux limites de Nyquist [79, 104].

Pour analyser plus finement les phénomènes en jeu, il convient cependant d'exploiter au maximum ces données instantanées de vitesses. Pour cela, les profils de vitesses ont été analysés par paquet de 5 profils *instantanés* successifs et ajustés par une loi de

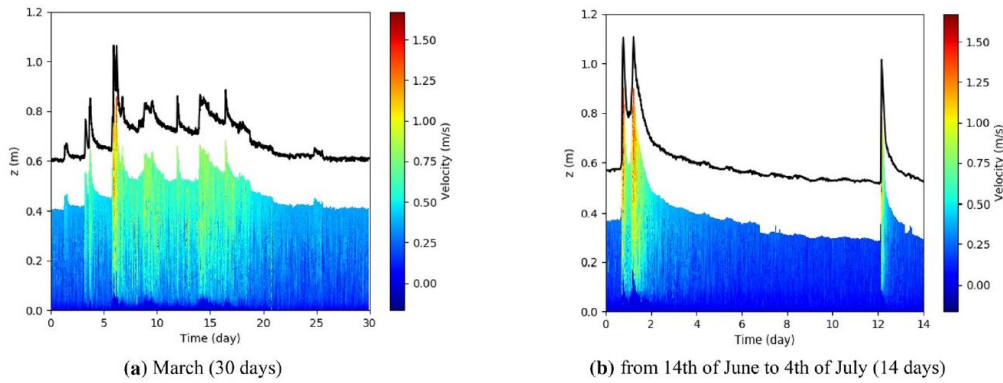


FIG. 3.15 – *Suivi temporel de la vitesse dans le repère fixe du site pour 2 périodes : (a) mars 2019, (b) à partir du 21 juin 2019. La courbe noire représente la position de la surface libre [51].*

Cheng [44] :

$$\frac{U(z)}{U_{max}} = \left(\frac{h}{z}\right)^{1/m}, \quad (3.1)$$

où $U(z)$ est la vitesse moyenne dans le sens du courant à une distance z du fond, U_{max} la vitesse limite de la loi au voisinage de la surface, h la hauteur d'eau et $1/m$ l'exposant de la loi de puissance avec $m = 3, 5$. Il est possible d'utiliser d'autres ajustements, comme la loi de Coles [66], avec des résultats et une analyse comparable [51, 104].

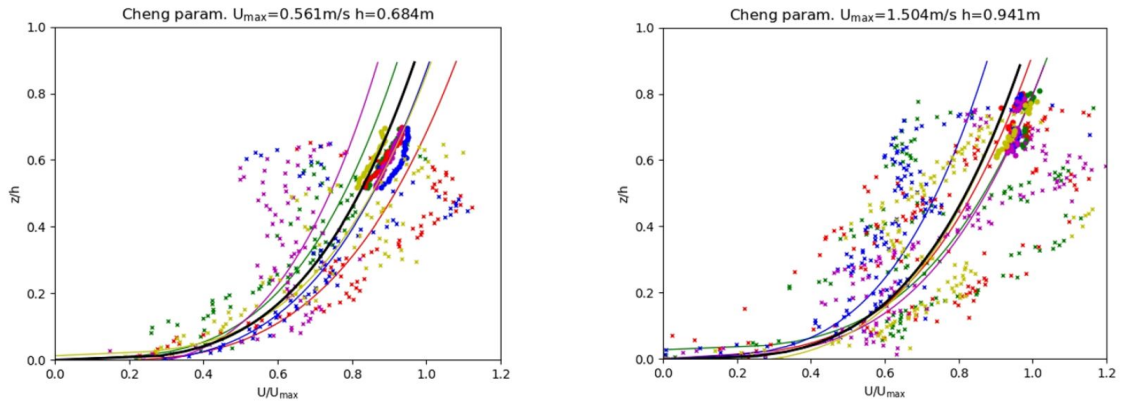


FIG. 3.16 – *Exemples de 5 profils successifs (5 minutes d'intervalle) de vitesses adimensionnées (● vitesses moyennées à proximité du capteur, × vitesses instantanées) à différentes dates : ajustement par une loi de Cheng sur chaque profil (courbes colorées) ou sur l'ensemble des données (courbe noire) [51].*

Deux conditions hydrauliques différentes (à des dates différentes) ont été considérées sur la figure 3.16. Elles permettent de faire les importantes observations suivantes et de mettre en avant les perspectives de cette première instrumentation en continu :

- pour les profils de vitesses *instantanées*, des fluctuations importantes sont observées à la fois en considérant un seul profil et entre les 5 profils successifs. C'est une caractéristique de l'écoulement dans une rivière réelle qui n'est pas aussi contrôlé

que dans un canal de laboratoire. Cependant un bon ajustement peut être obtenu avec l'équation (3.1) permettant d'évaluer les vitesses de cisaillement par exemple ;

- un bon accord peut être trouvé entre les profils de vitesses *instantanées* et les profils de vitesses *moyennées* au niveau du capteur ;
- les mesures permettent de caractériser les différentes conditions hydrauliques de la rivière.

Une analyse statistique complète des paramètres d'ajustement (hauteur et vitesse représentative) de la loi de Cheng (3.1) a été effectuée pour les périodes de temps considérées à la figure 3.14. Cette analyse est présentée à la figure 3.17. Tout comme l'analyse de la courbe caractéristique hauteur–vitesse $h_l - U_{2c}$, elle montre que le profil ajusté reste valable quel que soit la période observée (durée et saison).

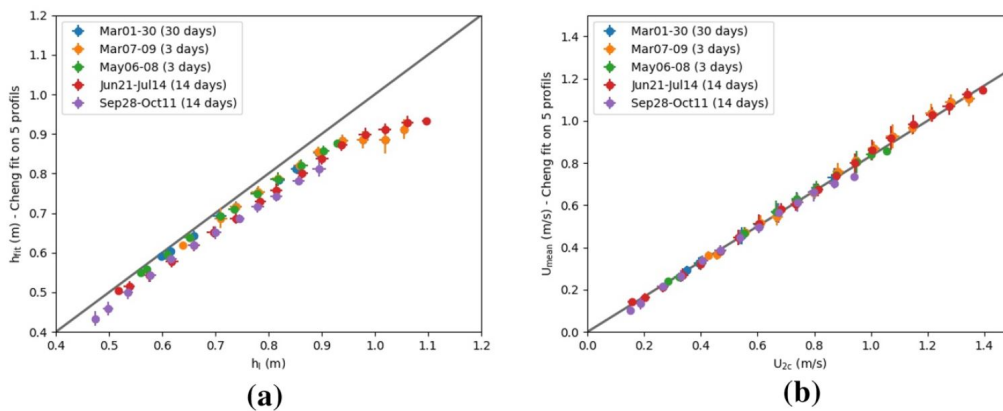


FIG. 3.17 – Évolution des paramètres d'ajustement de la loi de Cheng (sur 5 profils) pour différentes périodes : (a) hauteur d'eau ajustée h_{fit} en fonction du niveau d'eau h_l relevé par le limnimètre, (b) vitesse moyenne U_{mean} en fonction de la vitesse caractéristique U_{2c} [51].

Pour caractériser la dispersion des mesures du profil de vitesses instantanées, l'écart caractéristique des données instantanées de vitesses au profil ajusté (loi de Cheng) a été calculé avec la définition suivante :

$$\Delta U = \sqrt{\frac{1}{\text{nombre points de données}} \sum_{\text{points de données}} (U(z) - U_{fit}(z))^2}, \quad (3.2)$$

où les points de données typiques et leur ajustement ("fit") sont représentés à la figure 3.16.

La figure 3.18 présente l'évolution de cet écart divisé par la vitesse moyenne $\Delta U/U_{mean}$ en fonction du niveau d'eau pour les différentes périodes de temps considérées. Il peut être identifié que l'écart de la vitesse représente environ 25% de la vitesse moyenne, quel que soit le niveau de l'eau permettant ainsi que caractériser l'écart des valeurs instantanées de vitesses au profil moyenné dans une situation réelle.

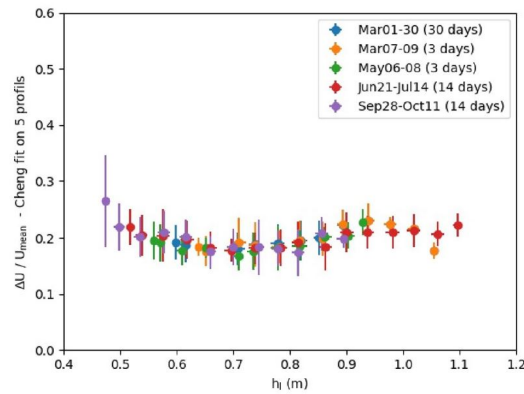


FIG. 3.18 – Évolution de l'écart caractéristique des données de vitesses à l'ajustement (loi de Cheng sur 5 profils successifs) en fonction du niveau d'eau pour différentes périodes [51].

Retour d'expérience

Un dernier point concernant le dispositif de suivi est sa robustesse face aux aléas naturels ou anthropiques. Un incident est notamment survenu le 5 juin 2019 lors de la tempête Miguel qui a généré une crue ponctuelle de la rivière. Des comportements anormaux ont ainsi été observés sur les données et l'incident a été confirmé grâce à la caméra de surveillance (Fig. 3.19) : un arbre mort a tordu le bâti. L'Aurence coule en effet dans une vallée calme et boisée principalement utilisée par les randonneurs et les cyclistes et l'entretien des berges reste limité. Finalement, l'équipe technique a pu réparer le dispositif dès que le niveau d'eau a suffisamment baissé pour permettre une exploitation en toute sécurité.

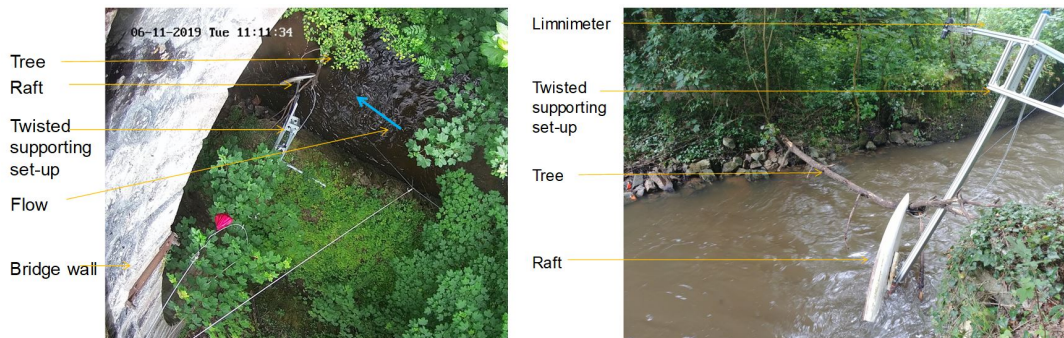


FIG. 3.19 – Endommagement du bâti de mesure suite au passage de la tempête Miguel le 5 juin 2019 [104].

Pour conclure sur cette expérience de suivi terrain pour une surveillance en continu des affouillements, nous retiendrons :

- la démonstration de la faisabilité d'une telle instrumentation ;
- la nécessité de bien préparer et de vérifier, en amont de l'installation, l'ensemble de l'instrumentation ;

- l'importance de pouvoir surveiller l'installation et d'intervenir en cas d'avarie sur le dispositif;
- la possibilité d'avoir une analyse robuste et approfondie des données qui permet notamment de suivre les affouillements et les données caractéristiques de l'écoulement.

Ce suivi s'est arrêté au bout de 9 mois, car le dispositif a malheureusement été endommagé de manière irréversible en novembre 2019 alors qu'étaient envisagées des améliorations notables dans l'acquisition.

Suivi du site du viaduc de l'A71 au dessus de la Loire

Dans le cadre de l'ANR SSHEAR, le viaduc autoroutier de l'A71 (Cofiroute) au dessus de la Loire à Orléans a été le second site instrumenté. Comme présenté sur la figure 3.20, le pont d'environ 400 m de long repose sur 6 appuis, 4 piles situées dans le lit du fleuve (notées P2 à P5 de la rive droite à la rive gauche) et deux culées (C1 et C6).

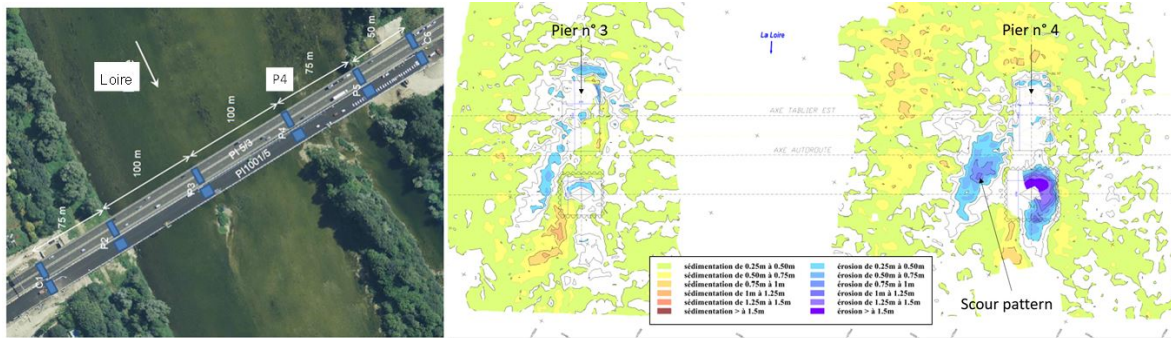


FIG. 3.20 – Site instrumenté du viaduc autoroutier de l'A71 sur la Loire à Orléans : vue aérienne du pont et comparaison des relevés bathymétriques entre mai 2016 et janvier 2018 [53].

Le Cerema/LR de Blois a un partenariat de longue date avec la société d'autoroute Vinci Autoroutes/Cofiroute gestionnaire de l'ouvrage et évalue les affouillements sur différents ponts depuis de nombreuses années. Des bathymétries SONAR ont ainsi été réalisées en 1993, 2004, 2011, 2016 et 2018 montrant des sites d'érosion/déposition actifs notamment sur la gauche du support de la pile P4 comme l'atteste la figure 3.20. C'est cette zone qu'il a donc été décidé de surveiller.

Comme détaillé à la figure 3.21, l'instrumentation mise en œuvre sur ce site, plus complexe que pour celui de l'Aurence, comprend :

- un limnimètre Valeport VRS-20 sur le pont pour mesurer le niveau d'eau ;
- un SONAR Kongsberg Dual Axis pour scanner la bathymétrie ;
- un profileur de vitesses ADCP Teledyne RDI Monitor 1200kHz pour mesurer le champ de vitesse 3D.

Le SONAR et l'ADCP ont été montés sur un radeau constitué de deux planches (Fig. 3.21b). Les capteurs sont connectés à un ordinateur et les mesures sont transmises à un serveur de données. Enfin, trois accéléromètres (un tri-axial PCB 629A11 et deux mono-axiaux PCB 393B31) complètent ce dispositif, les mesures accélérométriques étant présentées et discutées à la section 3.4.1.

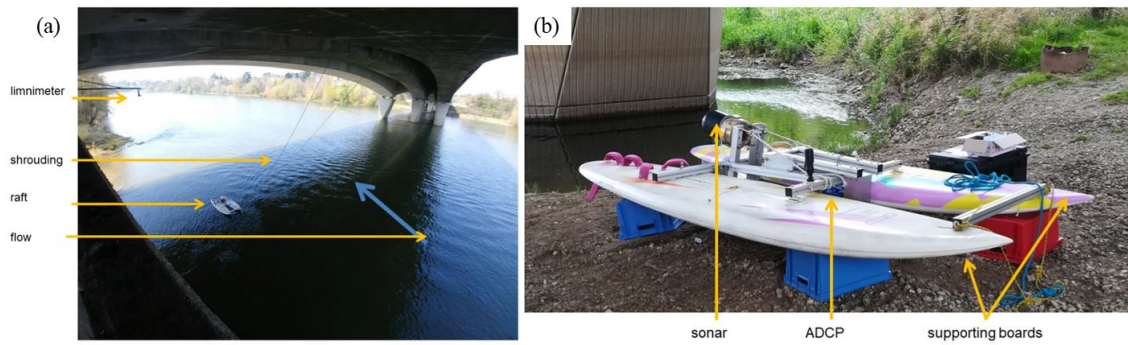


FIG. 3.21 – Dispositif d'instrumentation du viaduc autoroutier de l'A71 sur la Loire à Orléans : (a) vue générale, (b) détail du radeau.

Quelques résultats typiques de mesures sont illustrés à la figure 3.22.

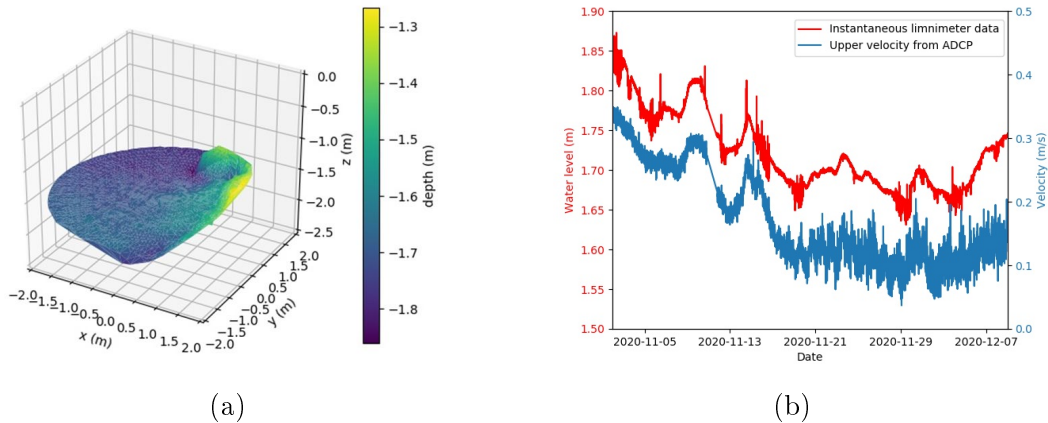


FIG. 3.22 – Site du viaduc autoroutier de l'A71 sur la Loire à Orléans : (a) exemple de relevés bathymétriques (mesures SONAR); (b) suivi typique du niveau d'eau (limnimètre) et de la vitesse supérieure (mesures ADCP) [105].

Le SONAR effectue des relevés bathymétriques toutes les heures. Contrairement au suivi sur l'Aurence, une partie notable de la surface (et non un seul point) peut être suivie comme illustré à la figure 3.22(a). Au-delà de profondeurs moyennes d'écoulement qu'il est possible d'évaluer et de corrélérer aux mesures limnimétriques [105], il est donc envisageable, avec cette configuration, de suivre la dynamique de l'ensemble de la fosse d'affouillement. Cela nécessite cependant la mise en œuvre d'algorithmes de corrélation entre les différents relevés bathymétriques pour pouvoir d'une part replacer spatialement les données et, d'autre part, y repérer les zones d'évolution.

La figure 3.22(b) présente, sur une période d'un mois, un extrait du suivi :

- du niveau d'eau, en référence locale, enregistré avec le limnimètre ;
- des vitesses *supérieures* mesurées à une distance comprise entre 0,60 et 1,20 m de la surface (moyenne effectuée sur les mesures avec l'ADCP).

La dynamique des deux données est extrêmement similaire avec une diminution pendant les 15 premiers jours et des fluctuations par la suite avec un niveau d'eau presque

stable. Un traitement plus avancé des données (avec prise en compte de leur fluctuation) pourra donc vraisemblablement conduire à l'obtention d'une « courbe de tarage » de l'écoulement comme considérée à la figure 3.14 pour le cas de l'instrumentation sur l'Aurence.

Ce suivi est toujours en cours avec, cependant, des difficultés principalement liées à la défaillance du fournisseur de l'instrumentation obligeant les partenaires (Cerema et Univ. Eiffel) à de nombreuses interventions. Il faut cependant souligner que le système de radeau pour porter l'instrumentation (Fig. 3.21) s'est montré particulièrement robuste et adapté.

3.3 Caractérisation des interactions sols-structures en situations modèles

L'affouillement du sol autour des appuis d'ouvrages change les conditions d'appuis et peut modifier leur comportement structurel. Afin de détecter ce phénomène et si possible le suivre, deux voies ont été investiguées en situations modèles en se focalisant sur les interactions sols-structures. D'une part, le développement d'une structure auxiliaire, correspondant à une tige instrumentée, a été étudié ouvrant la voie au développement de capteur d'affouillement. D'autre part, différents modèles de structures (piles et/ou ponts) soumis à affouillement ont été réalisés et testés à l'aide de méthodes vibratoires pour suivre la dégradation des conditions d'appuis.

3.3.1 Tige instrumentée : vers la mise au point d'un capteur d'affouillement

L'étude expérimentale menée en laboratoire a visé à étudier la faisabilité de la surveillance des affouillements à l'aide d'une tige instrumentée enfoncée dans le massif sédimentaire au niveau de la fosse d'affouillement. En effet, si le niveau de sédiments évolue (érosion ou déposition) les propriétés dynamiques de la tige évoluent également. Une étude paramétrique complète a ainsi été réalisée pour analyser les effets : de l'affouillement, de la géométrie et du matériau de la tige, de la longueur enfouie, de la nature du sol...

Principe

Le dispositif utilisé dans les différents essais est représenté à la figure 3.23. Une tige est enfoncée d'une certaine longueur dans un massif de sol à l'air libre : L est la longueur totale de la tige, D la longueur enfouie, H la longueur libre et a la hauteur, par rapport au niveau du sol, de la charge latérale appliquée. Selon les situations étudiées, un accéléromètre est installé en haut de la tige (études dynamiques) et/ou des fibres optiques sont collées (études statiques en déformation).

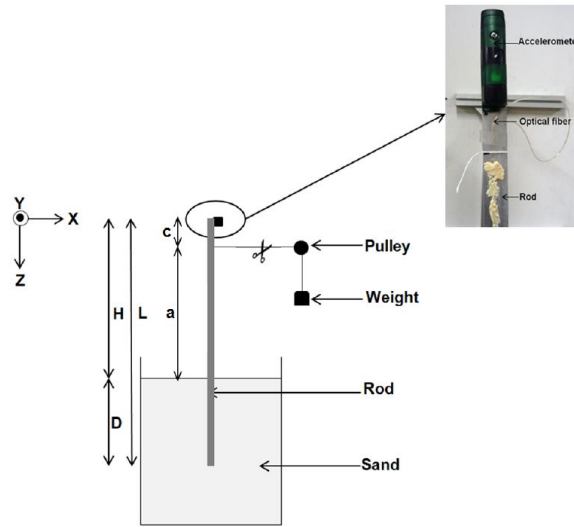


FIG. 3.23 – Montage expérimental des essais statiques et dynamiques et vue rapprochée de l'installation de la fibre optique. Les ciseaux montrent où le fil a été positionné pour appliquer (et relâcher, dans les essais dynamiques) la charge latérale F [24, 26].

Étude vibratoire

Deux massifs de sol ont été utilisés [23, 24] : un sable de Seine sec et un mélange sable-argile reconstitué avec 50% de sable de Fontainebleau et 50% d'argile Kaolinite et une teneur en eau de 25%.

Différents types de tiges ont été employées [23, 24] : 2 tiges circulaires en aluminium (diamètre 12 mm et épaisseur 1 mm, longueurs 800 mm et 600 mm, notées CA-80 et CA-60), 2 tiges plates à section rectangulaire en aluminium (section 19 mm \times 2 mm, longueurs 800 mm et 600 mm, notées RA-80 et RA-60), 1 tige circulaire en PVC (diamètre 20 mm et épaisseur 2 mm, longueur 800 mm, notée CP-80).

L'étude vibratoire a porté sur la mesure de la première fréquence propre des tiges enfoncées à différentes profondeurs entre 10 et 40 cm (échantillonnage à 512 Hz). Selon le contraste de rigidité entre sols et tiges, certaines configurations n'ont pu être étudiées, comme les tiges circulaires en aluminium dans le mélange sable-argile.

Les résultats de ces mesures sont présentés aux figures 3.24 pour le massif de sable et 3.25 pour le massif de sable-argile. La première fréquence propre est représentée en fonction de la longueur libre H . A partir du moment où la tige se comporte comme un corps flexible (à l'opposé d'un corps rigide, voir section 3.3.2), il est observé que cette fréquence propre ne dépend pas de la longueur enfouie D de la tige.

Une avancée importante dans l'étude a été ensuite d'introduire le concept de longueur effective de poutre encastree-libre équivalente comme illustré à la figure 3.26. La première fréquence propre de vibration de la tige enfoncée est en effet comparée à celle d'une poutre encastree-libre de même nature mais de longueur libre plus grande pour tenir compte de l'interaction sol-structure. Il est en effet possible de calculer la première fréquence propre théorique de la poutre encastree-libre *équivalente* de longueur L_e [125, 144] :

$$f_{th} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E_b I_b}{L_e^3 (0.24M + m)}} \quad (3.3)$$

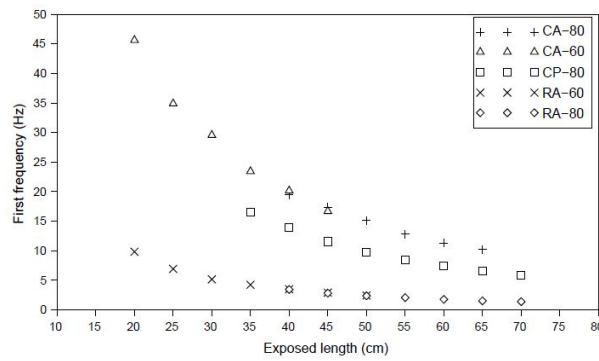


FIG. 3.24 – Variation de la première fréquence propre en fonction de la longueur libre H pour différentes tiges dans le massif de sable [23].

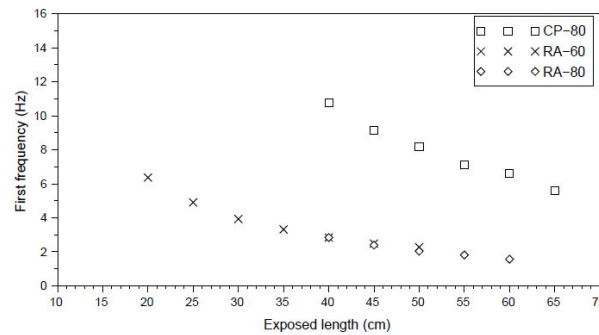


FIG. 3.25 – Variation de la première fréquence propre en fonction de la longueur libre H pour différentes tiges dans le massif de sable-argile [23].

où M est la masse totale de la poutre, E_b son module d'Young, I_b le moment quadratique de sa section par rapport à l'axe de rotation et m la masse de l'accéléromètre (placé en bout de tige/poutre). Il apparaît alors que les mesures sur la tige avec une longueur libre H sont en bon accord avec une simple translation d'une valeur d_d (indice d pour dynamique) des valeurs attendues pour une poutre encastree-libre et cela, quelque soit la longueur enfouie D de la tige.

La première fréquence propre (à type de tige et type de sol donné) quelque soit la longueur enfouie a peut être alors évaluée à partir de la formule :

$$f_{exp}(H, D, p_{ss}) = f_{th}(L_e = H + d_d(p_{ss})) , \quad (3.4)$$

où p_{ss} désigne l'ensemble des paramètres des interactions sol-structure : caractéristiques de la tige et du massif de sol. $d_d(p_{ss})$ est alors une longueur caractéristique de l'interaction sol-tige qui, si la tige est suffisamment enfoncée, traduit simplement qu'au delà d'une certaine distance (de l'ordre de d_d) en dessous de la surface du sol la tige se retrouve bloquée.

Les mesures pour les différentes tiges utilisées sont présentées aux figures 3.26(b) (tige circulaire en aluminium), 3.27(a) (tiges plates à section rectangulaire en aluminium) et 3.27(b) (tiges circulaires en PVC) pour les 2 types de massifs de sols. Les longueurs caractéristiques d_d évaluées pour les différentes configurations sont reportées au tableau 3.1. Elles varient de 4,0 à 11,0 cm.

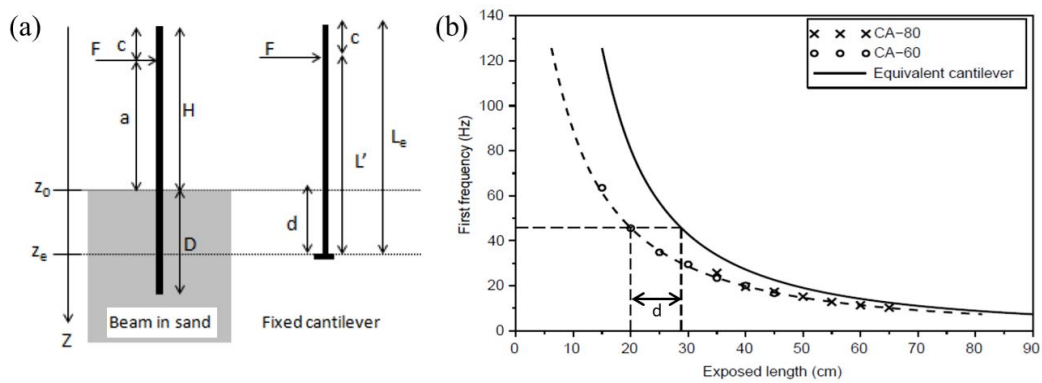


FIG. 3.26 – *Modèle de poutre encastrée-libre équivalente : (a) schéma de principe (F est la charge latérale appliquée dans le cas de l'étude statique), (b) résultats pour les essais sur les tiges circulaires en aluminium dans le massif de sable (données expérimentales, modèle (3.3) pour la poutre encastrée-libre en trait plein, courbe décalée d'une longueur fixe d en tirets) [23, 24].*

TAB. 3.1 – *Longueurs caractéristiques d_d pour les différentes configurations.*

Tiges testées	Valeur dans le massif de sable	Valeur dans le massif de sable-argile
CA-80, CA-60	8,8 cm	non testable
RA-80, RA-60	4,0 cm	11,0 cm
CP-80	4,6 cm	11,0 cm

En complément de cette étude expérimentale, des travaux numériques ont été réalisés sous Code-Aster³. En très bon accord avec les résultats expérimentaux, ils ont également permis d'étudier numériquement le cas de tiges immergées et de valider le concept de poutre encastrée-libre équivalente dans le cas immergé [23].

Ce concept a une retombée pratique particulièrement importante. En effet, la simple connaissance des propriétés vibratoires de la tige (Eq. 3.3) pourrait permettre de suivre le niveau d'affouillement à l'aide d'une tige encastrée dans une fosse d'érosion. Comme la différence de longueurs libres d_d entre une tige enfoncée et une poutre encastrée de même fréquence de vibration est constante (Eq. 3.4), il n'est alors pas nécessaire de connaître précisément les caractéristiques des interactions sol-structure pour déterminer le niveau d'affouillement.

Étude en déformation

L'étude statique en déformation a été menée sur une tige en aluminium de section rectangulaire (25 mm × 5 mm) et de longueur totale 1170 mm équipée de fibres optique collées sur les deux faces comme illustré à la figure 3.23. Une des fibres est donc sollicitée en traction et l'autre en compression. La mesure par fibre optique utilise la technique de réflectométrie temporelle dans le domaine fréquentiel (OFDR), et permet ainsi une

3. <https://www.code-aster.org>.

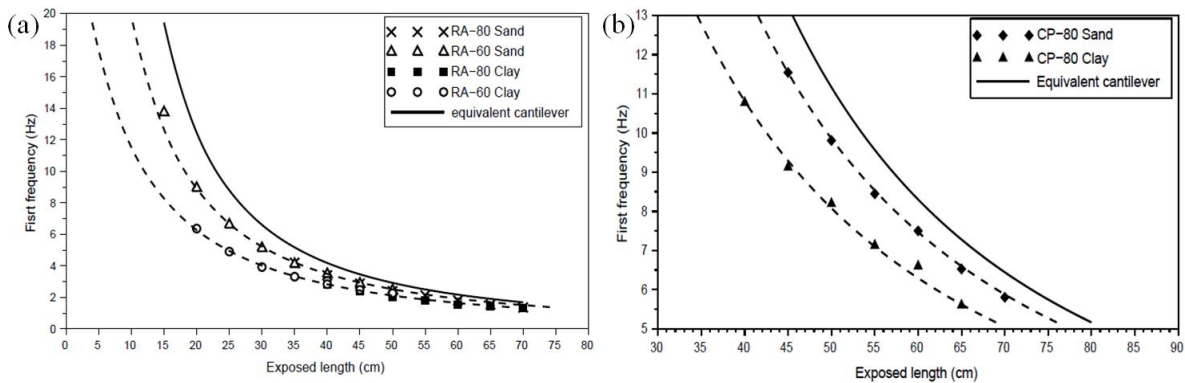


FIG. 3.27 – *Modèle de poutre encastrée-libre équivalente : (a) résultats et modèle pour les essais sur les tiges plates à section rectangulaire en aluminium dans le sable ou le mélange sable-argile, (b) résultats et modèle pour les essais sur les tiges circulaires en PVC dans le sable ou le mélange sable-argile [23].*

mesure distribuée de la déformation le long de la tige [137]. La tige est enfoncée dans un massif de sol constitué de sable de Seine à deux profondeurs D . Différents chargements latéraux (intensités F et excentricités a) ont été réalisés et la déformation le long de la tige a été mesurée, avec deux niveaux d'affouillement/enfoncement [24].

Une formulation analytique a également été proposée en se basant sur un modèle de Winkler [154] pour l'interaction sol-structure. La mise en équation prend la forme :

$$\begin{cases} E_b I_b \frac{d^4 w(z)}{dz^4} = 0 & \text{pour } z \in [-a, 0], \\ E_b I_b \frac{d^4 w(z)}{dz^4} + K_s w(z) = 0 & \text{pour } z \in [0, D], \end{cases} \quad (3.5)$$

avec E_b le module d'Young de la tige, I_b le moment quadratique de sa section, $w(z)$ le déplacement latéral, K_s le module de réaction du sol, a l'excentricité de la charge F et D la longueur enfouie de la tige (voir Fig. 3.23). En supposant K_s constant dans la profondeur, la solution générale de cette équation prend la forme :

$$\begin{cases} w_1(z) = a_1 z^3 + a_2 z^2 + a_3 z + a_4 & \text{pour } z \in [-a, 0], \\ w_2(z) = \exp(-\frac{z}{l_0}) \left(a_5 \cos(\frac{z}{l_0}) + a_6 \sin(\frac{z}{l_0}) \right) & \text{pour } z \in [0, D], \\ \quad + \exp(\frac{z}{l_0}) \left(a_7 \cos(\frac{z}{l_0}) + a_8 \sin(\frac{z}{l_0}) \right) & \end{cases} \quad (3.6)$$

où $l_0 = \left(\frac{4E_b I_b}{K_s} \right)^{\frac{1}{4}}$ est une longueur caractéristique de l'interaction sol-structure. Les paramètres a_1 à a_8 sont déterminés par les conditions aux limites et par les conditions de continuité en $z = 0$. En particulier $a_7 = a_8 = 0$ car la tige est suffisamment enfoncée (retenue dans le sol) pour que le terme divergeant soit considéré comme nul.

La résolution du système d'équations différentielles (3.5) permet de trouver le moment fléchissant le long de la tige et d'en déduire une forme analytique pour la déformation

de part et d'autre de la tige (i.e. au niveau des fibres optiques) [24] :

$$\begin{aligned}
 |\epsilon| &= \frac{Fh}{2E_b I_b} (z + a) && \text{pour } z \in [-a, 0], \\
 &= \frac{Fh}{2E_b I_b} \exp\left(-\frac{z}{l_0}\right) \left(l_0 \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) + a \left(\cos\left(\frac{z}{l_0}\right) + \sin\left(\frac{z}{l_0}\right) \right) \right) && \text{pour } z \in [0, D],
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

où h est l'épaisseur de la tige (i.e. la largeur de la section) et correspond donc à la distance entre les fibres des 2 cotés de la tige.

Cette formulation analytique ne présente pas de paramètres ajustables. L'ensemble des paramètres sont soit connus (caractéristiques physiques et géométriques de la tige) soit mesurés pour les besoins des essais (densité et module du sol, par minipresseur [112] notamment).

La figure 3.28 présente des résultats typiques obtenus sur la tige avec une longueur enfouie D de 40 ou de 30 cm (soit un affouillement de 10 cm) et un chargement latéral de 2 ou 4 N à $c = 5$ cm de l'extrémité de la tige ainsi qu'une comparaison avec les résultats analytiques.

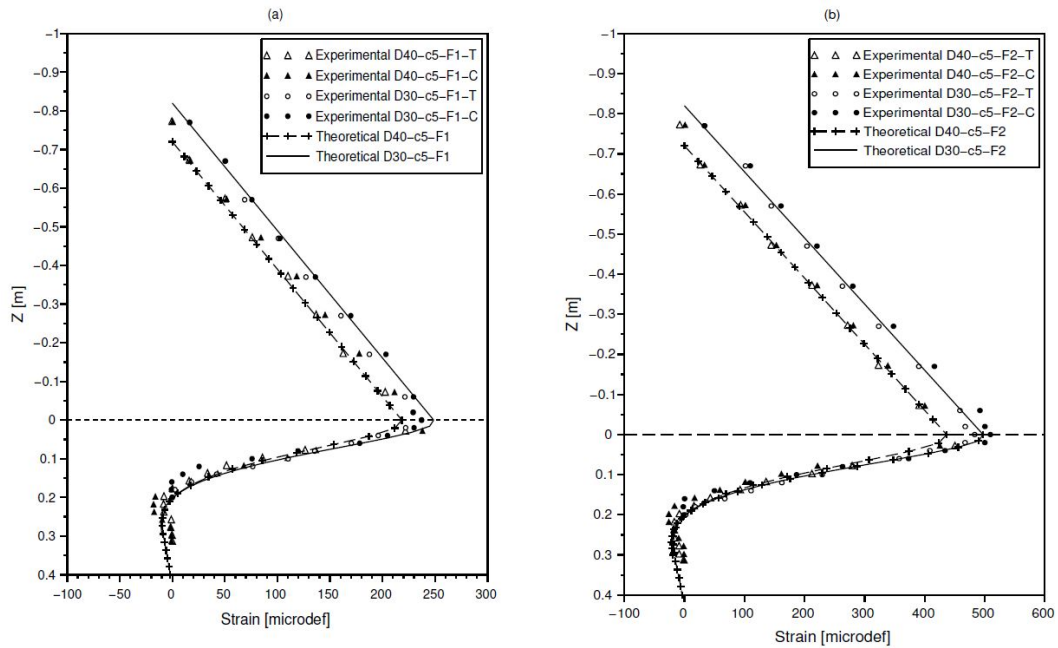


FIG. 3.28 – Profils de déformation le long de la tige en traction 'T' et en compression 'C' mesurés par fibre optique pour un chargement latéral F [(a) $F_1 = 2$ N, (b) $F_2 = 4$ N] appliqué à $c = 5$ cm de l'extrémité de la tige et une longueur libre de D de 40 ou 30 cm comparés aux résultats analytiques (Éq. 3.7) [24].

Nous constatons que les courbes de déformation obtenues avec la fibre en compression ou en tension sont similaires, ce qui prouve que la performance de la fibre optique n'est pas affectée par sa configuration (en traction ou en compression) dans le cas étudié ici. Le profil de déformation le long de la partie libre de la tige pour $z \in [-a, 0]$ est bien indépendant des propriétés du sol comme attendu par le calcul analytique (3.7). Par ailleurs, les résultats expérimentaux et analytiques sont en très bon accord avec moins

de 7% d'écart, y compris dans la partie enfouie pour $z \in [0, D]$, ce qui souligne la précision de la technologie de détection par fibre optique et la pertinence du modèle théorique.

De la même manière que pour l'étude en vibration et comme la partie libre de la tige présente bien une déformation indépendante des propriétés du sol, un modèle de poutre encastree-libre équivalente est proposé (Fig. 3.26a). Pour cela, les équations (3.5) sont résolues et permettent de calculer le déplacement $w(-a)$ au point d'application de la charge latérale F . Ce déplacement dépend notamment de l_0 et donc des propriétés d'interaction sol-structure. L'excentricité L' de la charge latérale de la poutre encastree-libre équivalente s'écrit alors selon la théorie d'Euler-Bernoulli :

$$L' = \sqrt[3]{\frac{3E_b I_b}{F} w(-a)} . \quad (3.8)$$

La longueur caractéristique additionnelle d_s (indice s pour statique) entre la tige enfouée et la poutre encastree-libre équivalente s'écrit alors :

$$d_s = L' - a . \quad (3.9)$$

Une application numérique montre que $d_s = 8,4$ cm.

Comparaison des approches dynamique et statique

L'étude de la vibration de la tige du paragraphe précédent est présentée à la figure 3.29. Un décalage horizontal d'une longueur $d_d = d_s = 8,4$ cm de la courbe obtenue pour une poutre encastree-libre permet de rendre compte de manière satisfaisante des données tant en déformation que vibratoires.

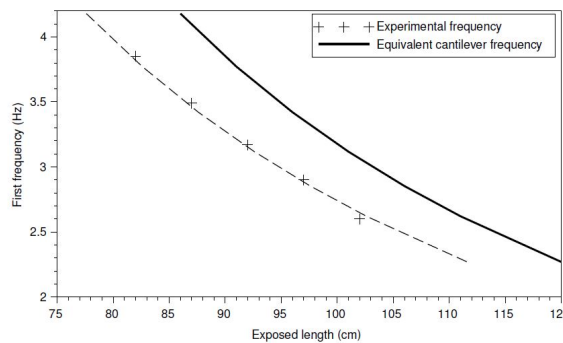


FIG. 3.29 – Variation de la première fréquence propre en fonction de la longueur libre H et comparaison avec les valeurs pour une poutre encastree-libre équivalente (3.3) en trait plein et courbe décalée d'une longueur fixe $d_d = d_s$ en tirets) [24].

Par ailleurs, une approche analytique en vibration utilisant un modèle plus complexe d'interaction sol-structure (modèle de Pasternak [119]) a également été menée [13]. Les accords restent alors très bons entre résultats expérimentaux et calculs analytiques comme présenté à la figure 3.30.

Pour conclure, les différentes approches menées pour étudier les comportements dynamique et statique d'une tige enfouie et affouillable ont montré une grande cohérence permettant de valider le principe de longueur libre additionnelle (notée d_d ou d_s) décrivant, par une analogie simple, la tige enfouie comme une poutre encastree-libre équivalente.

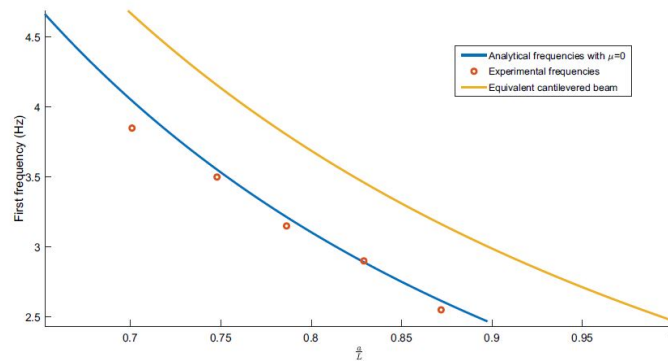


FIG. 3.30 – Variation de la première fréquence propre en fonction de la longueur libre notée a : résultats expérimentaux et analytiques [13].

3.3.2 Étude vibratoire des structures affouillables modèles

Pour l'instrumentation et le suivi des structures affouillables, plusieurs technologies suivant différents paramètres peuvent être utilisées mais sont souvent coûteuses ou à usage unique [149] : dispositifs de mesure de la profondeur de l'eau [104], colliers magnétiques coulissants [92], flotteurs "smart rocks" [32], systèmes radar [82] et réflectométrie [156]... Dans ce contexte, le suivi vibratoire à l'aide d'accéléromètres apparaît comme une solution économique mais dont la mise en œuvre reste un important sujet de recherche [103, 123].

Les études sur modèles réduits doivent ainsi permettre de mieux comprendre le suivi de la réponse vibratoire des structures comme méthode de détection des changements des conditions aux limites et plus particulièrement des modifications des conditions d'appuis dans le cas des ponts soumis aux affouillements.

Contrairement à l'étude menée dans la section précédente qui traitait de tiges souples, les structures étudiées dans cette partie sont des corps rigides considérés comme indéformables. Les études menées visent ainsi à comprendre la réponse vibratoire (fréquences propres, éventuellement déformées modales) de structures modèles lors d'essai d'impact (réponse impulsionnelle) en fonction des niveaux d'affouillement. Ces expérimentations ont été effectuées sur 2 configurations : piles « sèches » enfouies au laboratoire [14] et piles ou ponts modèles en canal hydraulique [25].

Vibrations rigides de piles - essais d'impact en modèle réduit

Les travaux menés ont porté sur des piles rigides dans des configurations comme celle présentée à la figure 3.31(a). Ces piles en béton armé sont de section circulaire ou rectangulaire. Elles sont plus ou moins enfouies dans un sol constitué de sable de Fontainebleau. Pour étudier le comportement vibratoire de ces piles soumis à affouillement, deux voies ont été investiguées et comparées [14] : solution analytique par une modélisation simple et étude expérimentale paramétrique. Nous ne détaillerons pas ici les développements analytiques [11] et nous concentrerons sur les résultats expérimentaux.

La figure 3.31(b) présente le dispositif d'essai constitué outre la pile modèle enfouie dans un bac de sable, d'un portique, d'une corde et d'une masse en guise de pendule pour l'impact. La figure 3.31(c) présente l'instrumentation typique d'une des 3 piles étudiées

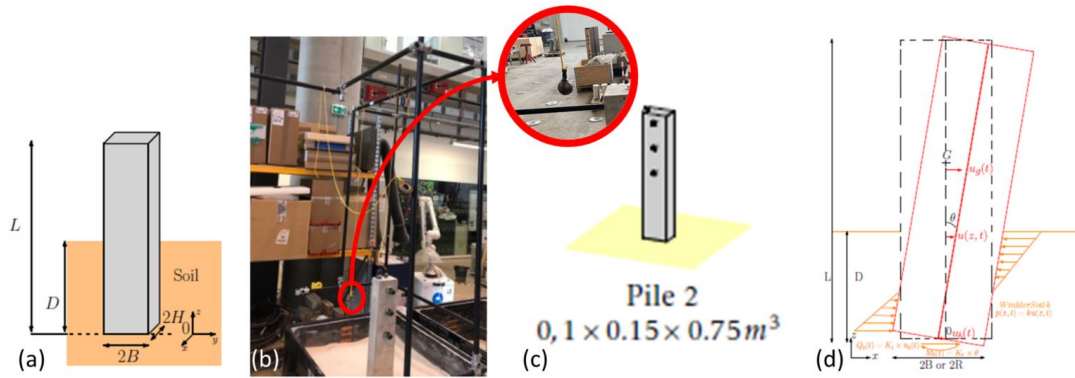


FIG. 3.31 – Essai d'impact : (a) pile modèle et paramètres d'essai, (b) dispositif expérimental, (c) placement des accéléromètres, (d) modèle analytique [14].

ainsi que son instrumentation : 4 accéléromètres bidirectionnels dans le plan horizontal (x et y) et synchronisés sont placés le long de la pile.

L'exploitation des mesures accélérométriques permet alors d'étudier la réponse vibratoire de la pile comme illustré à la figure 3.32.

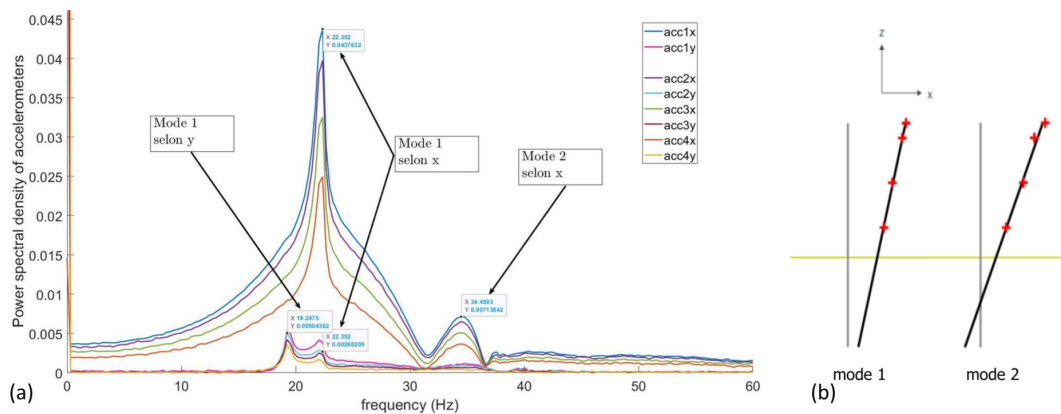


FIG. 3.32 – Identification expérimentale des modes propres pour la pile illustrée à la figure 3.31(c) et un enfouissement $D = 30$ cm : (a) densité spectrale de puissance et identification de 2 modes propres, (b) déformées modales correspondantes à ces 2 modes [14].

Comme cela peut être constaté à la figure 3.32(a), les densités spectrales de puissance des $N = 8$ mesures accélérométriques sont extrêmement corrélées. Cette corrélation est, dans le domaine fréquentiel étudié, à rapprocher du comportement de structure rigide de la pile.

Une étude des corrélations entre les différentes voies d'acquisition $y_{i \in [1, N]}(t)$ conduit à la définition d'une matrice de corrélation $(g_{yy}(\tau))_{i, j \in [1, N]^2}$ dont la transformée de Fourier $(G_{yy}(\omega))_{i, j \in [1, N]^2}$ peut être décomposée en valeurs singulières $S(\omega)$ [11, 14]. Cette décomposition permet de retrouver les fréquences propres des 2 premiers modes identifiables à la figure 3.32(a) et déterminer les déformées modales associées à ces modes et représentées à la figure 3.32(b).

La figure 3.33 rassemble les résultats obtenus pour la pile considérée et différents niveaux d'enfouissement D . Pour les 2 premiers modes identifiés, les fréquences propres sont représentées à la figure 3.33(a) et les déformées modales décrites par la position du centre de rotation sont données à la figure 3.33(b). En complément de ces mesures, les résultats de l'étude analytique menée sur un modèle de corps rigide à deux degrés de liberté (Fig. 3.31d) sont également représentés.

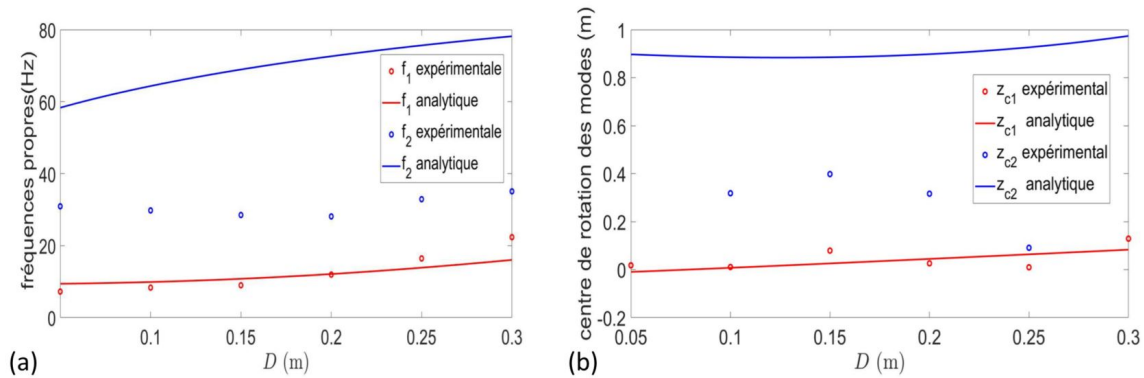


FIG. 3.33 – Comparaison des résultats expérimentaux et analytiques : (a) fréquences propres des 2 premiers modes propres en fonction de l'enfouissement D , (b) positions du centre de rotation en fonction de l'enfouissement D [14].

Nous observons un bon accord entre données expérimentales et résultats du modèle pour le premier mode. Cependant, pour le second mode, les résultats attendus ne sont pas en accord avec la réalité observée. En effet, les fréquences propres des seconds modes observés expérimentalement sont inférieures à celles calculées avec le modèle de corps rigide à deux degrés de liberté (Fig. 3.31d). De plus, la position du centre de rotation est, pour ce même mode, surévaluée par le modèle analytique.

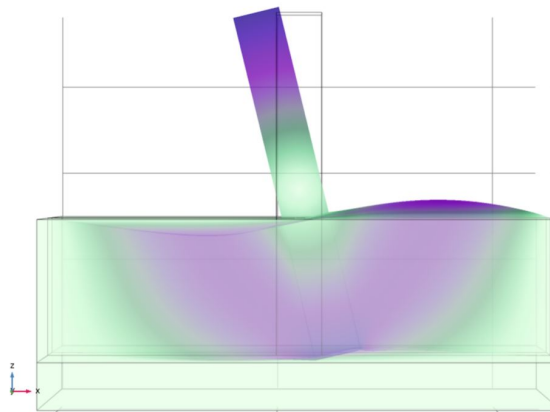


FIG. 3.34 – Modélisation par éléments finis du mode 2 de vibration [14].

En conclusion, cette étude éclaire sur la capacité à suivre et décrire les modes propres d'une pile rigide soumise aux affouillements en particulier :

- le premier mode est bien décrit par un modèle de pile rigide en rotation à proximité de sa base (mouvement pendulaire) ;

- le second mode est difficile à définir comme un mode de pile seulement : il existe en effet un couplage important entre le sol et la pile rigide comme cela peut, par exemple, être observé dans une simulation par éléments finis à la figure 3.34.

Structures modèles en canal hydraulique

La figure 3.35 présente les différentes configurations étudiées en canal hydraulique. Le canal est progressivement rempli de sable d'Hostun ($D_{50} = 0,6$ mm) jusqu'à une hauteur de 25 cm. La pile modèle en béton est cylindrique et a une longueur totale $L = 55$ cm et un diamètre $b = 11$ cm, qui respecte le rapport d'aspect des piles du viaduc de l'A71 à Orléans. La pile est initialement enfouie d'une profondeur $D = 20$ cm. Dans la configuration d'un pont modèle (Fig. 3.35d), les 2 piles sont séparées de 1,4 m et le tablier de 1,6 m de long et de 26 kg est placé au dessus sur 2 appuis en caoutchouc. Selon la configuration, 1 ou 2 accéléromètres sont placés sur les piles (Fig. 3.35a,d). Les impacts sont générés à l'aide d'un marteau sur les piles ou le tablier. Lors des essais, l'écoulement est progressivement augmenté dans le canal pour générer de plus en plus d'affouillement (Fig. 3.35b,c).

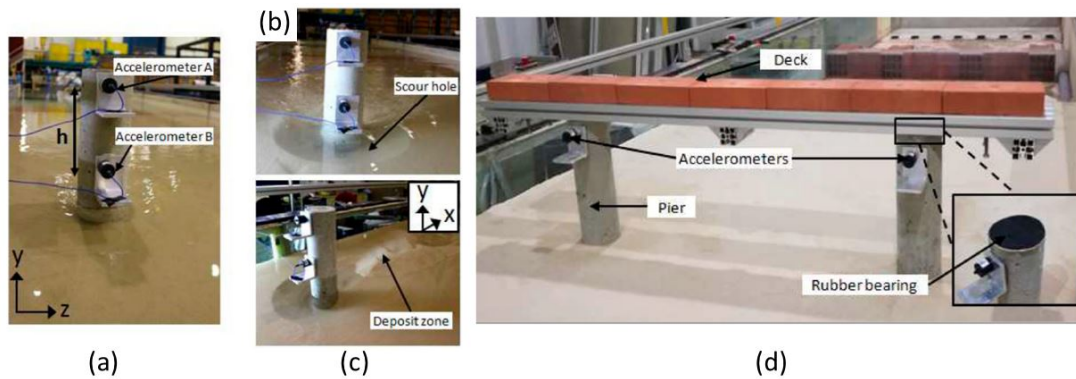


FIG. 3.35 – Dispositifs d'essai en canal : (a) configuration initiale (non affouillée) d'une pile simple, (b) et (c) pile affouillée, (d) modèle de pont [25].

La figure 3.36(b) présente les résultats obtenus sur une pile simple : la première fréquence propre en fonction de la longueur enfouie restante D . En complément de l'étude expérimentale une approche analytique simple a été proposée [25] où l'interaction sol-structure a été modélisée par des ressorts horizontaux le long de la pile (ressorts de Winkler [154]) et un ressort de rotation à la base (Fig. 3.36a). La raideur de ces ressorts et les différents paramètres de l'étude analytique sont issus d'études préalables. A noter que l'influence du ressort de rotation devient prédominante au fur et à mesure que l'affouillement augmente.

Les résultats montrent un bon accord entre les mesures expérimentales et le modèle analytique plus particulièrement si le ressort de rotation est spécifiquement calibré aux données d'essai. Les écarts des données expérimentales par rapport aux résultats analytiques pour les affouillements les plus faibles (i.e. les enfouissements D les plus importants) s'expliquent par une perte de rigidité du sol dans les 5 premiers centimètres.

La figure 3.37(b) présente des résultats analogues à ceux de la pile simple mais obtenus dans la configuration du pont modèle. Pour prendre simplement en compte la présence

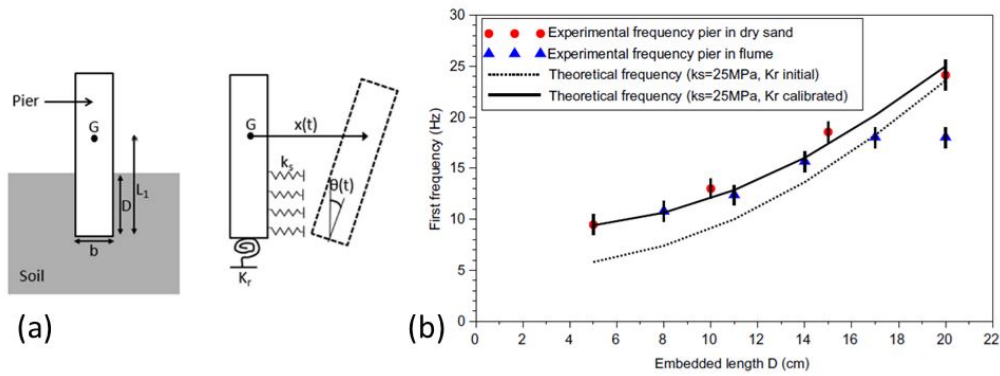


FIG. 3.36 – Essais sur pile simple : (a) paramètres et modélisation, (b) résultats expérimentaux et analytiques [25].

du tablier dans l'approche analytique, il a été proposé que chaque pile supporte la moitié du poids du tablier. Le tablier est alors modélisé comme une masse placée au sommet de chaque pile (Fig. 3.37a).

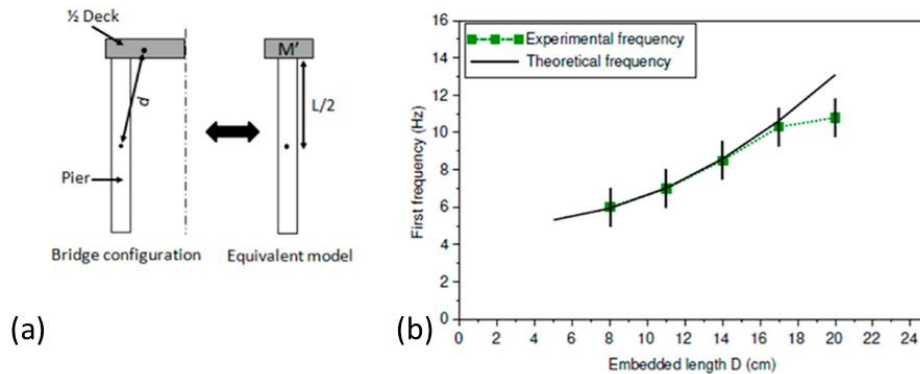


FIG. 3.37 – Essais sur pile dans le cadre d'un modèle de pont : (a) paramètres et modélisation, (b) résultats expérimentaux et analytiques [25].

Un bon accord entre les résultats analytiques et les résultats expérimentaux est de nouveau obtenu. Par conséquent, le modèle est capable de prédire la variation de la fréquence des piles en fonction de l'affouillement lorsque le tablier du pont est correctement pris en compte.

3.4 Suivi et cotation des ouvrages affouillables

Plusieurs approches de recherche ont permis de mieux suivre et caractériser les ouvrages soumis à affouillement. La particularité des travaux menés est double :

- taille croissante des objets ou groupes d'objets étudiés (ouvrage réel, ensemble d'ouvrages, réseau routier) ;
- grande variété des méthodologies mises en place (analyse du signal, apprentissage automatique, physique des systèmes complexes).

La première approche a permis de traiter le suivi d'ouvrages à l'aide de méthodes vibratoires avec la mise en place d'une instrumentation à demeure et le développement d'analyses spécifiques pour le suivi des modifications des conditions aux limites.

La seconde approche a consisté à développer un système de cotation d'ouvrages à risque d'affouillements au sein d'un parc d'ouvrages à l'aide de méthodes d'apprentissage automatique puis d'analyser cette cotation par l'utilisation de méthodes d'intelligence artificielle explicable (XAI).

Une dernière approche a traité de la caractérisation de la vulnérabilité sociétale par rapport au risque de la défaillance d'un ouvrage avec l'utilisation d'outils d'analyse des systèmes complexes pour modéliser un réseau routier.

3.4.1 Suivi vibratoire des ouvrages affouillables

En complément du suivi hydraulique et bathymétrique de la section 3.2.2 et dans le prolongement de l'étude vibratoire de structures affouillables modèles de la section 3.3.2, le viaduc de l'A71 au dessus de la Loire (Fig. 3.20) a également fait l'objet d'un suivi vibratoire [11, 12, 52, 105].

Étant donné la complexité de la structure et de son environnement naturel (vent, forces hydrauliques...) et anthropique (trafic routier, poids lourds essentiellement), il n'est pas possible de considérer cette structure comme un système mécanique simple où entrées (solicitations) et sorties (réponses) seraient connues et permettraient alors de connaître l'ensemble des paramètres structuraux et des conditions aux limites. Pour faire face à cela, il convient donc de raisonner uniquement sur les sorties (ici les mesures vibratoires) vues comme des processus stochastiques et d'utiliser des outils d'analyse, en particulier modale, pour caractériser et suivre la structure. C'est l'objet de l'analyse modale opérationnelle ou "operational modal analysis" [33, 34].

La figure 3.38 présente le pont et les capteurs installés. Les accéléromètres (un tri-axial PCB 629A11 et deux mono-axiaux PCB 393B31) sont installés à deux points de mesure différents : en haut de la pile P4 et dans le tablier du pont. Pour chacun des points de mesure, deux composantes de l'accélération sont suivies : selon z , l'axe vertical et selon x , l'axe de l'écoulement hydraulique. Au total, 4 canaux de sortie sont ainsi collectés et les signaux acquis sont représentés par :

- $w_1(t)$ pour le suivi du signal selon z en haut de la pile ;
- $w_2(t)$ pour le suivi du signal selon x en haut de la pile ;
- $w_3(t)$ pour le suivi du signal selon z dans le tablier ;
- $w_4(t)$ pour le suivi du signal selon x dans le tablier.

Ils sont enregistrés à l'aide d'un système National Instrument sur des durées de $\delta T = 5$ minutes toutes les 20 minutes à une fréquence d'échantillonnage $f_s = 200$ Hz. Des capteurs de température complètent cette instrumentation

La figure 3.39 présente les densités spectrales de puissance quotidiennes de chaque signal à partir de la transformée de Fourier de l'autocorrélation [12]. Ces réponses en fréquence peuvent être interprétées d'un point de vue du couplage physique. En effet, les réponses en haut de pile ($W_1(\omega)$ et $W_2(\omega)$) ont une puissance concentrée dans des plus hautes fréquences par rapport aux réponses dans le tablier ($W_3(\omega)$ et $W_4(\omega)$). Cependant, certains modes de couplage apparaissent vraisemblablement où des pics de fréquence sont présents pour toutes les réponses.

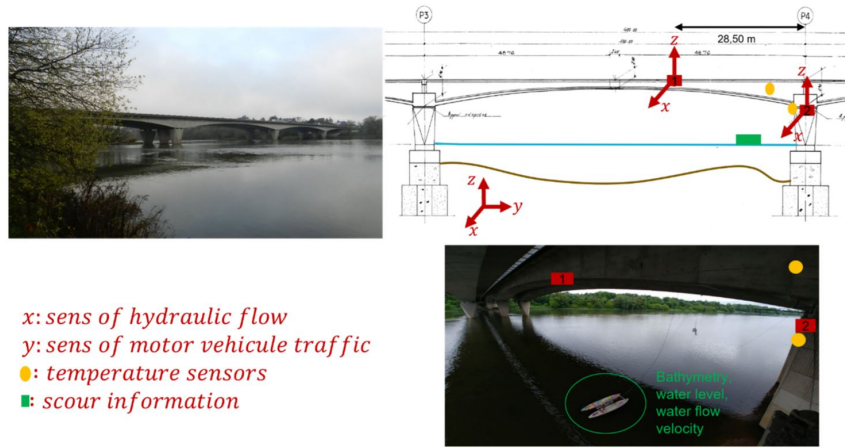


FIG. 3.38 – Instrumentation vibratoire du viaduc autoroutier de l'A71 sur la Loire à Orléans [12].

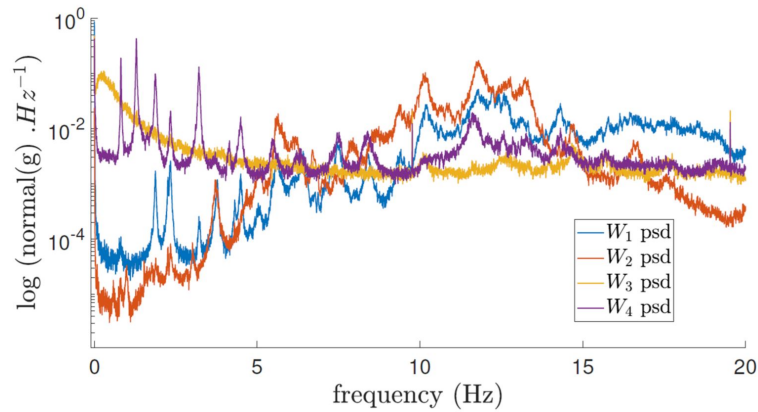


FIG. 3.39 – Densité spectrale de puissance des différentes sorties via la transformée de Fourier des autocorrélations : moyenne sur une journée [12].

Pour aller plus loin dans l'analyse et étudier le système dans sa globalité (i.e. recherche de modes propres), il faut considérer ensemble les différents signaux acquis. Nous allons en donner brièvement la méthodologie [12] et en tirer les premières conclusions et perspectives.

La première étape est de considérer, pour une acquisition ΔT le vecteur des signaux de sorties $\{w(t)\} = (w_1(t), w_2(t), w_3(t), w_4(t))^T$ ($\{\}^T$ dénotant la transposée) et d'en calculer la matrice de corrélation $[r_{ww}(\tau)]$, fonction de τ le décalage temporel :

$$[r_{ww}(\tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \{w(t)\} \{w(t - \tau)\}^T dt . \quad (3.10)$$

Les termes diagonaux de cette matrice sont les autocorrélations des signaux $w_i(t)$.

L'étape suivante consiste à calculer la transformée de Fourier de cette matrice et de la moyenner sur les différents acquisitions temporelles d'une journée pour obtenir la matrice de densité spectrale de puissance $[R_{WW}(\omega)]$ relative à cette journée. Les $W_i(\omega)$ de la figure 3.39 correspondent aux termes diagonaux de cette matrice.

De sorte à séparer les différents modes propres de cette matrice caractéristique du système étudié, une décompositions en composantes principales est ensuite menée en utilisant deux méthodes :

- EVD "eigen value decomposition" pour décomposition en valeurs propres [34] ;
- MAC "modal assurance criterion" pour critère d'assurance modale [101].

Le résultat de cette décomposition, qui identifie 4 composantes principales, est présenté à la figure 3.40.

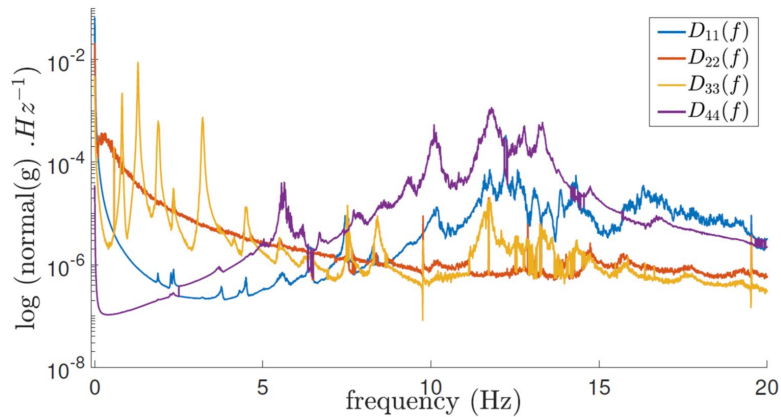


FIG. 3.40 – Décomposition en composantes principales dans le domaine fréquentiel de la matrice de densité spectrale de puissance avec la méthode EVD-MAC [12].

La méthode peut être répétée pour chaque jour sur de longue période. Pour analyser la robustesse des résultats, un algorithme de sélection et de suivi des pics de fréquence est utilisé. L'identification et le suivi des fréquences propres de la quatrième composante de la figure 3.40 sont représentés à la figure 3.41. Le suivi de cette quatrième composante a été choisi car elle est la composante principale la plus importante dans la gamme de fréquence relative aux modes de vibrations liés à la pile ($W_1(\omega)$ et $W_2(\omega)$ de la figure 3.39).

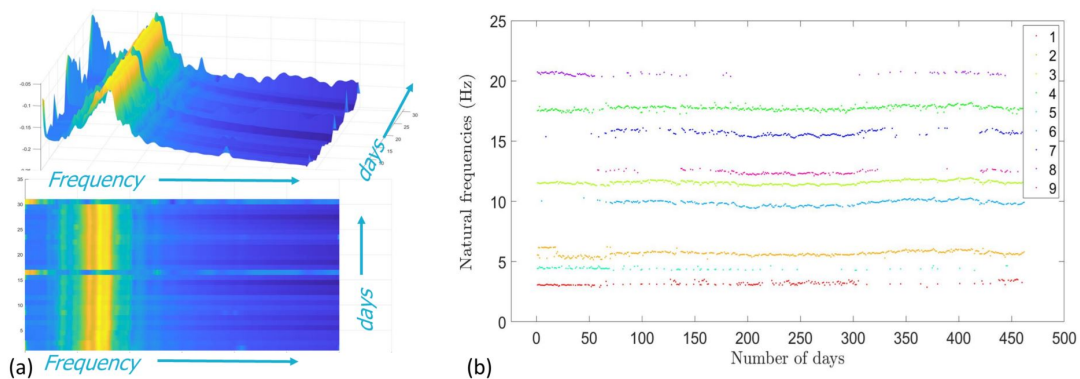


FIG. 3.41 – Suivi des fréquences propres de la structure : (a) spectrogramme de la quatrième composante principale, (b) suivi des pics identifiés [12].

De faibles variations des fréquences propres peuvent être observées au cours du temps. Une analyse de corrélation avec les grandeurs mesurées montre une forte dépendance avec

la température [11, 12]. Cela était attendu car la température a une influence significative sur les propriétés mécaniques des matériaux ainsi que sur les conditions aux limites de l'ouvrage modifiant, par conséquent les propriétés vibratoires. Des analyses doivent encore être menées pour déterminer la possibilité de détecter d'autres dépendances notamment par rapport aux affouillements.

En conclusion et au delà du suivi spécifique de cet ouvrage, les travaux menés ont permis de développer une méthodologie spécifique pour le traitement des données vibratoires qui peut être reproduite sur d'autres sites.

3.4.2 Cotation d'ouvrages affouillables par intelligence artificielle

Plusieurs modèles d'évaluation des risques d'affouillements des ouvrages ont été développés avec des démarches de recherche ou plus pratique. Les travaux de recherche s'intéressent, pour la plupart, à caractériser de manière probabiliste l'aléa (crues, inondations) et l'affouillement induit au niveau des structures pour les croiser à la vulnérabilité des structures [18, 36, 143]. Dans la pratique, des méthodes plus empiriques ont été également proposées pour sélectionner plus rapidement les structures à haut risque notamment les guides anglais de la "British Highways Agency" [35], français du Cerema [38] et japonais du "Railway Technical Research Institute" (RTRI) [140].

Une voie intermédiaire a été explorée dans des travaux menés avec SNCF Réseau dans le cadre d'une thèse CIFRE [150, 151] pour disposer d'un modèle pragmatique permettant de détecter rapidement et précisément les structures à haut risque. En effet, les modélisations numériques sont souvent trop longues et coûteuses pour être appliquées à un grand nombre de structures, tandis que les procédures empiriques sont trop simplifiées pour traiter de manière adéquate les événements naturels complexes et en évolution du fait du changement climatique.

Prenant la suite de travaux existant sur l'évaluation des risques par apprentissage automatique ("machine learning") sur des ouvrages de génie civil [2, 37, 73], nous nous sommes intéressés à l'utilisation de ces méthodes intelligence artificielle pour évaluer le risque d'affouillement des infrastructures ferroviaires à partir des données fournies par la SNCF.

Méthodologie

La figure 3.42 illustre schématiquement l'approche menée :

1. rassemblement des données caractéristiques et prétraitement ;
2. utilisation de 4 modèles d'apprentissage différents sur des ensembles données d'apprentissage/données de test pour évaluer les risques d'affouillement ;
3. évaluation des résultats de ces 4 modèles ;
4. caractérisation de l'importance des données caractéristiques du modèle le plus performant ;
5. caractérisation des interaction entre données caractéristiques.

Pour construire la base de données nécessaire, les paramètres d'entrée ont été choisis sur la base des guides existants [35, 38, 135, 139, 140]. De plus, une analyse exploratoire

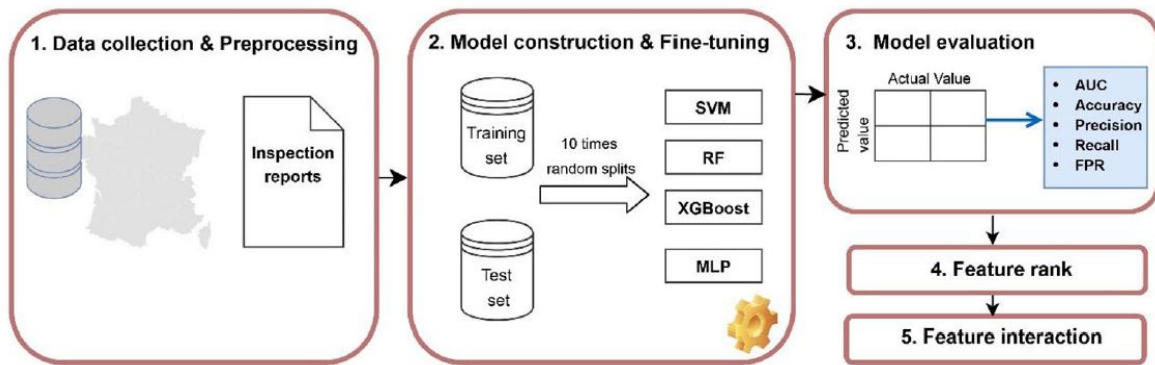


FIG. 3.42 – Approche proposée pour construire le modèle d'apprentissage automatique [151].

des données (AED) a été réalisée pour éliminer, de l'ensemble des données caractéristiques, celles présentant un nombre élevé de valeurs manquantes ou une faible variance. Des discussions ont également été menées avec des experts de la SNCF pour s'assurer que les données requises correspondent à celle recueillies actuellement lors des inspections sur le terrain. Au final, 18 données caractéristiques ont été sélectionnées comme paramètres d'entrée. Le tableau 3.2 présente une description succincte de ces données. Pour des raisons de commodité, chaque donnée est représentée par un symbole. A noter qu'il existe quatre types de données caractéristiques : grandeurs numériques (Num.), variables ordinales (Ord.), variables catégorielles ou nominales (Nom.) et variables binaires i.e. à deux catégories (Bin.). La variable de sortie est le risque d'affouillement divisée en deux classes : risque d'affouillement élevé et risque d'affouillement faible. Il s'agit donc, au final, d'une variable binaire.

La base de données utilisée repose sur 208 éléments d'ouvrage (piles) de 75 ponts différents.

Préalablement à l'utilisation des algorithmes d'apprentissage automatique, une étape préliminaire a été le prétraitement des données. En effet, les algorithmes utilisés ont besoin de données numériques (entrées et sortie(s)). Pour les données d'entrée, le prétraitement dépend du type de variable.

- les variables numériques sont normalisées sur l'intervalle $[0, 1]$;
- les variables ordinales sont classées avec des entiers par ordre croissant $\{0, 1, 2 \dots\}$;
- les variables nominales sont représentées par des n -uplets par exemple l'ensemble $\{(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)\}$ pour $n = 3$ catégories non ordonnées ;
- les variables binaires sont représentées par 0 ou 1.

L'unique variable de sortie est binaire (0 ou 1). Pour aboutir à cela, les algorithmes utilisent (optimisent) ainsi un seuil sur des résultats de sortie qui sont en pratique des réels (pas nécessairement compris entre 0 et 1 comme nous le verrons dans la suite).

Quatre algorithmes d'apprentissage artificiel ont été utilisés : "Extreme Gradient Boosting" (XGBoost) [43], "Support vector Machine" (SVM) [67], "Random Forest" (RF) [28], "Multilayer Perceptron" (MLP) [107].

Ces algorithmes ont été utilisés sur la base de données en divisant cette dernière en 2 : jeux de données d'entraînement (70% des données) et jeux de données de test (30%

TAB. 3.2 – Description des variables caractéristiques dans la base de données [151].

	Group	Symbol	Variable	Type
Input	Environment	C1	Flow type	Ord.
		C2	Slope of riverbed (%)	Num.
		C3	Flood flow (m ³ /s)	Num.
		C4	Width of valley/ Width of high flow channel	Num.
		C5	Topography	Ord.
		C6	Flow sinuosity	Ord.
		C7	Riverbed material	Ord.
	Bridge characteristics	B8	Pier shape	Ord.
		B9	Foundation type	Nom.
		B10	Existence of foundation scour countermeasures	Bin.
	History	H11	Scour history	Bin.
		H12	Flood history	Bin.
	Changing factors	I13	Susceptible of scour	Bin.
		I14	Channel rating	Ord.
		I15	Riverbank rating	Ord.
		I16	Existence of dislocation or deformation	Bin.
I17		Existence of local scour	Bin.	
		I18	Rating of other damages (corrosion, timber piles degradation, cracks, etc.)	Ord.
Output		O19	Scour risk	Bin.

des données). Afin d'évaluer la robustesse de chaque modèle, 10 séparations aléatoires des données d'entraînement et de test ont été effectuées.

Pour caractériser la pertinence des résultats, différents indicateurs ont été évalués. Ces indicateurs se basent sur la définition de la matrice de confusion (Tab. 3.3) répartissant l'ensemble des prédictions en 4 catégories selon leur capacité à prédire (ou non) la valeur réelle de sortie (positif : risque élevé ou négatif : risque faible).

TAB. 3.3 – Matrice de confusion pour analyser les résultats des algorithmes de prédiction [151].

		Actual Values	
		Positive (high scour risk '1')	Negative (low scour risk '0')
Predicted Values	Positive (high scour risk '1')	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	Negative (low scour risk '0')	False Negative (FN)	True Negative (TN)

Les indicateurs de performance utilisés sont les suivants :

- exactitude ("accuracy") : $\frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN}$;
- précision ("precision") : $\frac{TP}{TP+FP}$;
- rappel ("recall") : $\frac{TP}{TP+FN}$;
- taux de faux positif ("false positive rate - FPR") : $\frac{FP}{FP+TN}$.

Les résultats de l'apprentissage automatisé seront d'autant plus satisfaisants que les 3 premiers indicateurs se rapprochent de 1 et le quatrième de 0.

Résultats

Les tableaux 3.4 et 3.5 rassemblent les différents indicateurs de la performance des algorithmes sur les jeux de données d'entraînement et de test respectivement. Les moyennes et écarts-types des mesures effectuées sur les 10 répartitions aléatoires de données d'entraînement ou de test y sont donnés. En plus des indicateurs précédemment décrits, figure l'AUC ("Area Under the ROC Curve") [76, 151] qui ne sera pas détaillé ici.

TAB. 3.4 – *Évaluation de la performance des modèles sur des jeux de données d'entraînement [151].*

	AUC	Accuracy	Precision	Recall	FPR
XGBoost	0.981±0.009	0.959±0.012	0.970±0.010	0.974±0.014	0.085±0.057
RF	0.978±0.006	0.923±0.011	0.915±0.006	0.988±0.034	0.260±0.006
SVM	0.931±0.010	0.887±0.009	0.939±0.012	0.905±0.015	0.164±0.033
MLP	0.959±0.008	0.917±0.014	0.960±0.009	0.927±0.014	0.112±0.028

TAB. 3.5 – *Évaluation de la performance des modèles sur des jeux de données de test [151].*

	AUC	Accuracy	Precision	Recall	FPR
XGBoost	0.974±0.023	0.938±0.023	0.961±0.022	0.956±0.031	0.114±0.065
RF	0.971±0.016	0.907±0.026	0.897±0.027	0.985±0.016	0.314±0.078
SVM	0.918±0.024	0.878±0.024	0.922±0.028	0.914±0.045	0.222±0.093
MLP	0.957±0.020	0.922±0.028	0.957±0.021	0.930±0.035	0.111±0.066

Parmi les quatre algorithmes utilisés, le modèle "XGBoost" obtient les meilleurs indicateurs d'exactitude et de précision pour les données de test (comme sur les données d'entraînement). En outre, il obtient un taux de faux positifs pratiquement aussi faible que le modèle "MLP". Le modèle "RF" a le rappel le plus élevé, mais il a également le taux de faux positifs le plus élevé, ce qui indique qu'il aura une probabilité plus élevée de fausses alertes (une fondation à faible risque d'affouillement évaluée comme une fondation à risque d'affouillement élevé). En pratique, cet algorithme risque donc de surestimer les risques sur les ouvrages, générer plus de travaux inutiles de maintenance et augmenter le coût de la maintenance au final. En conclusion, le modèle basé sur "XGBoost" présente des performances très satisfaisantes par rapport aux autres algorithmes d'apprentissage automatique.

En complément de la classification (prédiction de la donnée de sortie), l'algorithme "XGBoost" donne également une « importance » des différentes variables caractéristiques d'entrée dans la prédiction. Sans rentrer dans les détails de calcul, le fonctionnement de l'algorithme repose sur l'utilisation d'arbres de décision multiples dans lesquels les variables d'entrée peuvent diviser les arbres selon certains critères. L'importance correspond alors au nombre de fois que chaque variable est utilisée.

La figure 3.43 présente l'importance des différentes variables caractéristiques détaillées au tableau 3.2.

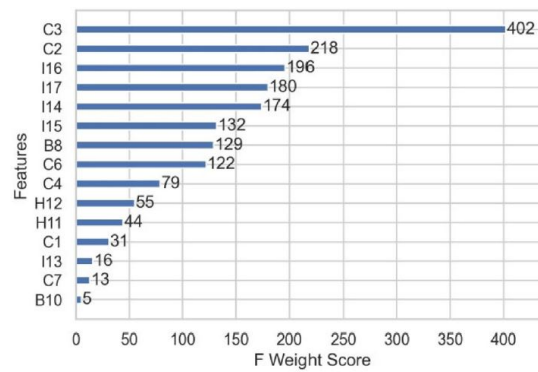


FIG. 3.43 – Importance des différentes variables caractéristiques de la base de données listées au tableau 3.2 [151].

La donnée caractéristique C3 (débit de crue) est la variable la plus importante avec une utilisation deux fois plus importante que la deuxième donnée caractéristique. Elle est suivie par les caractéristiques C2 (pente du lit de la rivière), I16 (existence de déformations) et I17 (existence d'affouillements locaux). Parmi ces quatre caractéristiques les plus importantes, les deux premières C3 et C2 appartiennent à la catégorie environnement. En d'autres termes, outre les dommages observés lors de chaque inspection visuelle, les caractéristiques hydrologiques et le régime morphologique de la rivière (caractéristiques C3 et C2) jouent un rôle prépondérant dans l'évaluation du risque d'affouillement des ponts. Il convient également de noter que deux caractéristiques C5 et B9 (topographie et type de fondation respectivement) ne sont pas incluses dans le classement car elles n'ont pas du tout été utilisées par l'algorithme comme critères de croissance des arbres de décision.

Analyse par méthodes d'intelligence artificielle explicable (XAI) et avis d'experts

Pour aller plus loin dans l'analyse des résultats d'apprentissage automatique, deux voies ont été explorées et comparées [150] :

- l'intelligence artificielle explicable (XAI - "eXplainable Artificial intelligence") ;
- le jugement d'experts.

Le modèle SHAP ("SHapley Additive exPlanation") [108] est un outil souvent utilisé en XAI. D'une manière simplifiée, il permet d'interpréter la prédiction d'un algorithme $f(\mathbf{x})$, où $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots\}$ est le jeu de données d'entrée, par la somme des effets ϕ_i de chaque donnée x_i :

$$f(\mathbf{x}) = \phi_0 + \sum_{j=1}^M \phi_j h_x^{(j)}(x_j), \quad (3.11)$$

où $h_x^{(i)}$ est une fonction dite de « mappage ».

Les résultats typiques d'un tel modèle sont donnés à la figure 3.44 qui présente les diagrammes dit « en cascade » pour deux cas d'ouvrage. La partie basse du diagramme montre la valeur de base ϕ_0 , moyenne des prédictions. Ensuite, chaque ligne indique la contribution (rouge : positive ou bleue : négative) de chaque variable à la prédiction

du modèle. La valeur correspondante de chaque variable caractéristique est indiquée en gris sur le côté gauche. Ainsi, à la figure 3.44(a), la pente du lit de la rivière (C2) et l'absence d'affouillement local (I17) sont les deux facteurs les plus importants pour diminuer le risque d'affouillement, tandis qu'à la figure 3.44(b), l'existence d'un affouillement local (I17), l'existence de déformations (I16), la pente du lit de la rivière (C2) et l'existence d'un historique d'affouillement (H11) sont les quatre facteurs les plus importants d'augmentation de la valeur de base et par conséquent du niveau de risque.

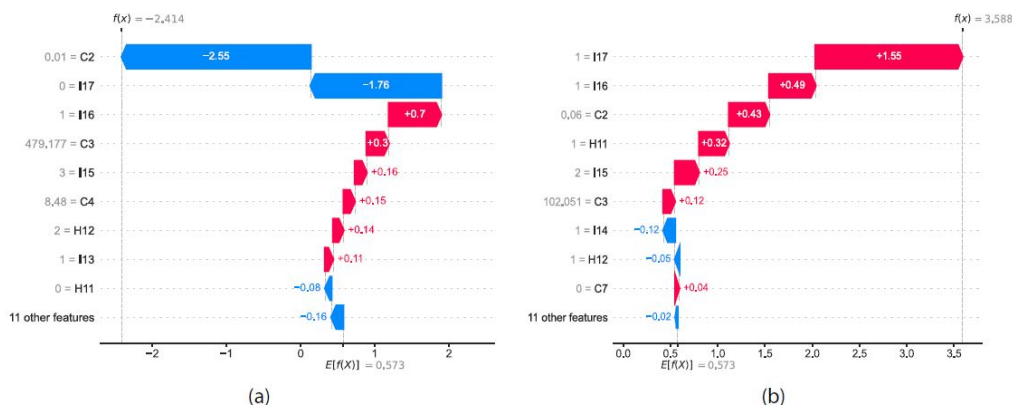


FIG. 3.44 – Explication d’impact SHAP des variables caractéristiques pour deux exemples issus de la base de données : en rouge, les variables ayant un impact positif (prédiction plus élevée) et, en bleu, celles ayant un impact négatif (prédiction plus basse) [150].

La figure 3.45 présente les résultats globaux de l’analyse SHAP. Les effets de chaque variable pour l’ensemble des cas d’ouvrages sont donnés à la figure 3.45(b) tandis que la figure 3.45(a) donne l’importance globale comme moyenne de la valeur absolue des effets.

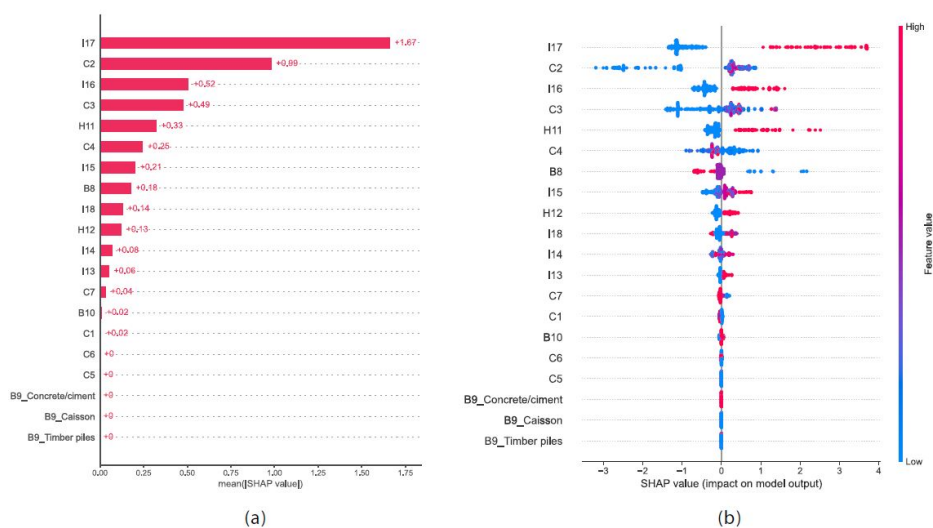


FIG. 3.45 – Importance globale des variables caractéristiques en utilisant les valeurs de SHAP : (a) importance globale moyenne, (b) analyse statistique [150].

Une valeur élevée de l'importance globale moyenne est le signe d'un poids important de la variable caractéristique dans la prédiction. Ainsi, nous retrouvons que les paramètres prépondérants sont l'existence d'affouillements locaux (I17), la pente du lit de la rivière (C2), l'existence de déformations (I16) et le débit de crue (C3). Ce sont des résultats analogues aux résultats d'importance donnés par l'algorithme "XGBoost" quoique dans un ordre différent.

En parallèle de cette analyse algorithmique, un sondage a été effectué auprès de 26 ingénieurs avec des niveaux d'expérience variés dans le secteur de l'inspection et de la maintenance pour recueillir leur avis sur l'importance des variables caractéristiques d'entrée (Tab. 3.2). Il leur a été proposé de noter de 1 (peu important) à 4 (très important) l'influence des variables sur le risque d'affouillement. Le résultat de ce jugement d'experts est présenté à la figure 3.46.

L'importance donnée par les experts n'est pas en accord complet avec l'analyse SHAP bien que l'existence d'affouillements locaux (I17) soit le paramètre prépondérant dans les 2 cas. Cela peut s'expliquer pour plusieurs raisons.

Un ingénieur effectue l'analyse des risques dans une perspective spécifique et émet des jugements fondés sur des mécanismes physiques. Cependant, le modèle d'apprentissage automatique fait des prédictions en apprenant uniquement à partir des données, d'algorithmes et de relations statistiques. Ainsi, les variables importantes pour les ingénieurs peuvent être déjà reflétées ou couvertes par d'autres variables dans les interprétations XAI en raison de la nature différente des méthodologies. Par exemple, le type d'écoulement (C1) et la topographie (C5) peuvent être reflétés par la pente (C2) et la largeur du lit majeur de la rivière (C4). Les fissures (information couverte par la variable I18) sur les piles des ponts pourraient refléter la capacité portante insuffisante de la fondation du pont, représentée par le type de fondation (B9)...

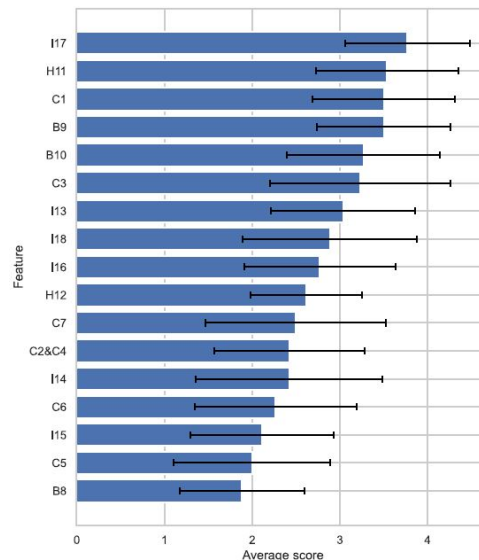


FIG. 3.46 – Importance globale des variables caractéristiques selon le jugement d'experts [150].

Le rôle du modèle d'apprentissage automatique dans l'ensemble du processus d'inspection et de maintenance est d'aider les ingénieurs à prendre des décisions, mais les tâches des ingénieurs sont plus complexes que cela. Ils doivent par exemple prévoir la programmation des travaux de maintenance une fois que l'ouvrage est considéré comme à risque. Les ingénieurs ont ainsi une compréhension globale qui inclut des facteurs tels que le type d'écoulement (C1), le type de fondation (B9) et l'existence de contre-mesures à l'affouillement (B10).

3.4.3 Vers une caractérisation de la vulnérabilité sociétale

Les infrastructures de transport jouent un rôle important dans l'aménagement du territoire à toutes les échelles (locale, régionale, nationale, internationale). Les événements liés au changement climatique, combinés aux aléas tels que les tremblements de terre ou les inondations, exposent les infrastructures routières mais aussi ferroviaires à des sollicitations de plus en plus nombreuses qui conduisent à la possibilité d'une défaillance d'une ou plusieurs structures. L'affouillement des piles de ponts en est un exemple particulier.

Pour cette raison, un défi important pour les réseaux de transport est d'améliorer leur résilience en maintenant un niveau donné de fonctionnalité pendant un événement dangereux tout en leur permettant de se rétablir rapidement après [132, 145]. À cette fin, il est utile de disposer d'une méthode d'évaluation efficace pour identifier les vulnérabilités des composants du réseau de transport et leur impact sur la fonctionnalité ce réseau [152].

De nombreuses études sur les réseaux de transport sont basées sur la modélisation du réseau d'infrastructures selon la théorie des graphes et des systèmes complexes [1, 19, 116], ce qui permet d'effectuer une analyse du réseau afin d'estimer des indices de performance [10, 71, 136]. Le réseau est alors décrit comme un ensemble de lien (les routes) et de nœuds (les croisements) pouvant avoir des propriétés variées (localisation, type de routes, limitation de vitesse...).

Dans un réseau routier de transport, la fonctionnalité peut être mesurée par l'accessibilité des différents points du réseau par les usagers, assurée par l'utilisation des routes (liens du réseau). La défaillance ou la détérioration de composantes du réseau routier (mais aussi les incidents de circulation ou les activités d'entretien...) peuvent entraîner une réduction de l'aptitude au service c'est à dire une augmentation des temps de déplacement. Il a ainsi été proposé, dans le cadre du projet européen PANOPTIS, le développement d'un indice particulier pour évaluer l'augmentation du temps de trajet dans une situation dégradée en exploitant la connaissance de la topologie du réseau routier : l'indice de perte de fonctionnalité ou "loss of serviceability (LoS) index".

Cet indice LoS a été développé et utilisé pour mesurer la vulnérabilité des routes/liaisons individuelles dans une étude de cas sur les autoroutes espagnoles afin d'obtenir une mesure de la vulnérabilité du réseau [98, 124]. Le tronçon d'autoroute étudié est présenté à la figure 3.47.

Le calcul de l'indice LoS est basé sur l'évaluation de deux mesures principales dans l'analyse du réseau complexe, à savoir les temps de parcours et les chemins les plus courts. L'analyse du réseau a été possible car le tronçon d'autoroute sélectionné fait partie d'un réseau routier plus large qui comprend un système de routes primaires (autoroutes) et secondaires (nationales, départementales, communales...). L'analyse évalue en effet l'augmentation du temps de trajet du chemin le plus court dans le cas d'une situation

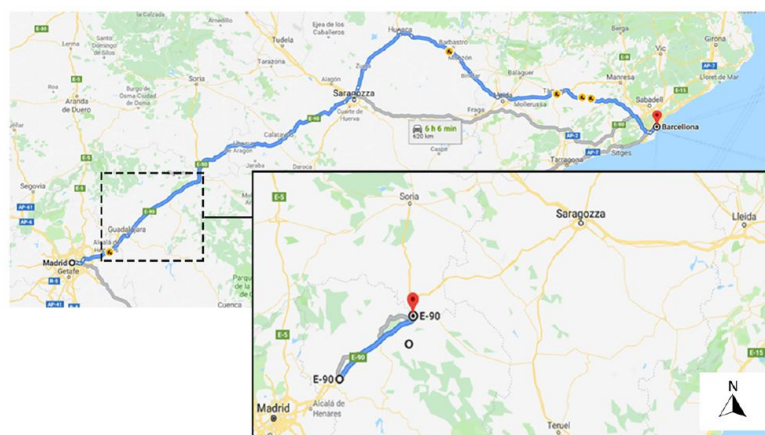


FIG. 3.47 – Localisation de la section étudiée de l'autoroute A2 en Espagne (source : © Google Maps (2022)) [98].

dégradée (réduction totale de l'aptitude au service), ce qui nécessite l'existence d'itinéraires alternatifs à ceux de la situation non dégradée (capacité maximale d'aptitude au service).

Plusieurs étapes ont permis de bâtir cette analyse, en particulier l'utilisation de cartes OpenStreetMap (OSM) [7] ainsi que l'utilisation de bibliothèques dédiées sous Python notamment OSMnx [20]. Ces étapes sont représentées à la figure 3.48.

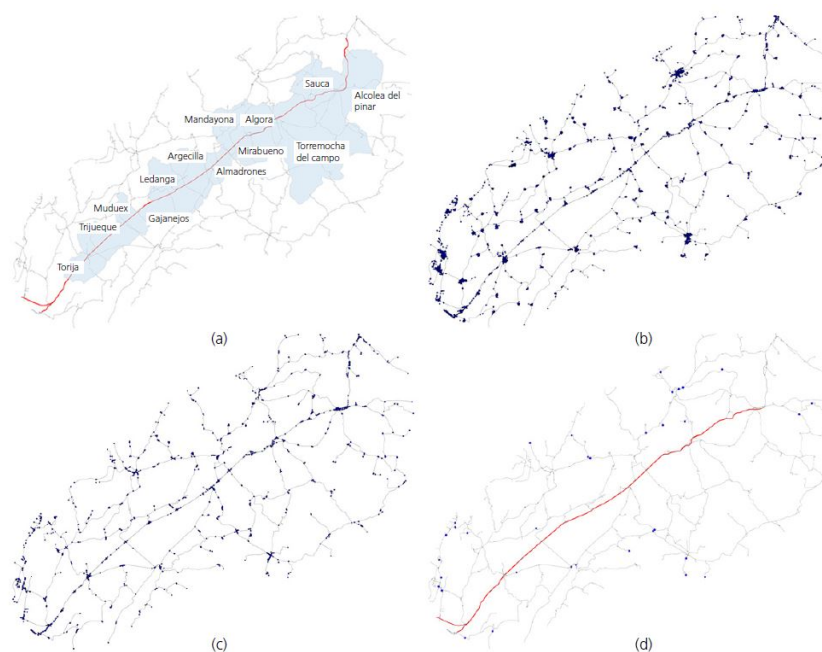


FIG. 3.48 – Cartographie du réseau routier étudié : (a) autoroute A2 localisé en rouge sur la carte OSM, (b) structure du graphe extrait avec OSMnx, (c) structure du graphe simplifié, (d) nœuds choisis aléatoirement pour l'étude statistique des parcours impliquant les liens de l'autoroute A2 en rouge [98].

A partir de l'infrastructure objet de l'étude, un tronçon de l'autoroute A2 long de 77 km (Fig. 3.48a), une extraction du réseau dans un voisinage de 50 km a été effectuée (Fig. 3.48b). Ce réseau comportant un nombre trop élevé de nœuds (38 400) et de liens (74 000), une simplification a été effectuée pour aboutir à un réseau simplifié constitué de 2400 nœuds et 4500 liens environ (Fig. 3.48c). Finalement, dans l'objectif de calculer un ensemble de trajets représentatifs en situations normale et dégradée, un ensemble de nœuds origine-destination a été tiré aléatoirement (Fig. 3.48d).

L'utilisation des outils d'analyse des systèmes complexes a alors permis de définir et d'utiliser l'indice LoS en évaluant les temps de parcours les plus courts entre des couples de nœuds origine-destination (Fig. 3.48d) en situation normale ou dégradée. Cet indice LoS, défini pour chaque partie de l'autoroute, est le temps de trajet supplémentaire moyen causé par l'indisponibilité de cette partie de route.

La figure 3.49 résume une partie du travail réalisé en présentant les valeurs médianes de perte de fonctionnalité pour l'ensemble du tronçon d'autoroute étudié. A noter qu'au delà de ces résultats une étude statistique plus complète a également été menée [98].

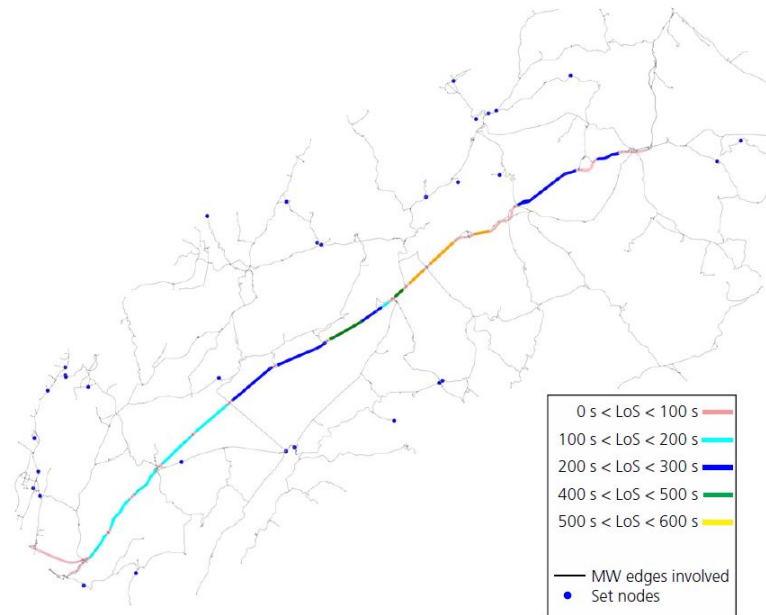


FIG. 3.49 – Valeur médiane de la perte de fonctionnalité [98].

L'analyse du réseau et l'indice proposé LoS montrent une évaluation de la vulnérabilité du réseau routier en exploitant des informations facilement accessibles, telles que la structure du réseau, à l'aide d'une base de données géographique libre.

Les perspectives de tel travaux sont multiples, notamment en la couplant avec la demande (réelle ou projetée) de transport :

- analyse de risques en croisant cette vulnérabilité sociétale avec l'aléa et les enjeux ;
- estimation de la résilience du réseau à un aléa ou une indisponibilité (accident par exemple) d'une partie de ce réseau ;
- outil de planification de la maintenance du réseau pour en réduire les conséquences...

3.5 Conclusion et perspectives de la thématique

Dans l'objectif de mieux caractériser les ouvrages soumis aux affouillements, les travaux présentés dans ce chapitre ont permis des avancées significatives tant dans la compréhension des interactions complexes entre sol, structures et eau en écoulement que dans le suivi des ouvrages. Ils illustrent les développements possibles en croisant les approches mécanique, physique, statistique, numérique et analytique aux différentes échelles étudiées.

Ils se poursuivent au travers de différentes actions :

- poursuite des travaux avec la SNCF sur l'analyse de risques et le diagnostic/suivi des ouvrages ;
- valorisation des instrumentations en cours (projets IA2 et site SSHEAR de l'A71).
- action dans la convention DGITM sur le retour d'expérience d'instrumentations ;
- démarrage d'un projet Européen ERIES sur la surveillance et l'évaluation des performances structurelles des ponts affouillés sous actions dynamiques ;
- propositions de collaboration renforcée (encadrement de stages et doctorants) avec le Japon, notamment l'université de Tokyo.

Dans le cadre des travaux présentés dans ce chapitre, l'instrumentation complète (bathymétrique, hydraulique et vibratoire) d'ouvrages affouillables a été une approche novatrice pour comprendre les phénomènes d'érosion et assurer le suivi des ouvrages. Ces travaux restent ainsi à poursuivre au travers de nouvelles instrumentations ou amélioration d'instrumentations existantes, du recueil puis de l'analyse détaillée de données de suivi et d'essai, de la rédaction de méthodologies et préconisations pour la réalisation de tels instrumentations et suivis...

Sur ces sujets, les collaborations entre spécialistes des différentes disciplines (mécanique des sols, des fluides et des structures, géotechnique, hydraulique...), partenaires académiques et privés, au niveau national et international, restent toujours un élément clef pour avancer.

Conclusion générale et perspectives des travaux de recherche

Au fil de ce manuscrit, j'ai présenté, selon un découpage par processus, les travaux que j'ai menés ou encadrés sur la thématique de l'érosion et l'affouillement des ouvrages. Ces travaux couvrent un large spectre d'objets étudiés et d'approches autour des « sols, eaux et structures » : ouvrages et (géo)matériaux, laboratoire et terrain, essais, suivis et catégorisation. . .

Dans la grande diversité des situations rencontrées, ma contribution a été de comprendre, caractériser et suivre les phénomènes physiques en œuvre de manière à en tirer de nouvelles ou de meilleures connaissances des ouvrages dans leurs interactions avec le milieu environnant.

Au laboratoire, je me suis attaché à développer et mettre en pratique des essais et méthodes robustes permettant de solliciter et caractériser les sols et les structures dans différentes situations : érosion de trou, érosion par jets, dispersion dans l'eau, suffusion, effets des affouillements sur les structures modèles. . .

En complément de ces essais, des études paramétriques ont ainsi pu être menées pour mieux comprendre les interactions eau-sol ou sol-structure : durabilité des matériaux traités, écoulement et blocage dans les milieux poreux, caractérisation simplifiée de l'interaction sol-tige tant en déformation qu'en dynamique. . .

Sur le terrain, j'ai eu l'occasion de développer et mettre en œuvre des dispositifs d'essais et de suivi des processus d'érosion et d'affouillement tant sur les ouvrages en terre que sur les ponts avec une grande diversité d'approches : essais ponctuels ou réguliers, suivis en continu, mesures géotechniques, hydrauliques, acoustiques, vibratoires. . .

Enfin, j'ai mené ou encadré des analyses de données variées dans l'ensemble des situations rencontrées : développement de modèles d'interprétation, analyse statistique des résultats, méthode d'apprentissage automatisé, analyse sur réseaux complexes. . .

Comme souligné à plusieurs reprises, cela a donc été une démarche pluridisciplinaire et multi-échelle que je souhaite poursuivre notamment au travers de collaborations en France et à l'international.

De nombreuses questions restent en effet ouvertes, par exemple :

- des questions fondamentales : comment comprendre et caractériser l'initiation de l'érosion par conduit ? comment mieux caractériser les sollicitations hydrauliques (contraintes, influence de la turbulence. . .) et les paramètres physiques des sols influençant l'érosion ? . . .

- des questions appliquées : comment suivre et caractériser les cycles d'érosion et déposition à proximité des ouvrages ? comment caractériser et modéliser le vieillissement des matériaux ? ...
- des questions « pratiques » et des enjeux sociétaux : quelles analyses de risques des ouvrages ? quels outils de gestion ou d'alerte ? comment assurer la maintenance et l'entretien des ouvrages ? ...

Deux enjeux ou défis transverses me semblent à prendre en compte ou traiter dans ce contexte :

- l'accroissement de la quantité de données acquises ainsi que le développement des méthodes d'intelligence artificielle. La multiplication possible des systèmes d'instrumentation et des capteurs (à bas coût notamment) et, en conséquence, des données acquises que ce soit lors d'essais ou bien, plus souvent, lors du suivi des ouvrages (e.g. suivi vibratoire des structures) nous impose de réfléchir sur la valeur donnée à cette information, son stockage et son traitement notamment à l'aide d'apprentissage automatisé par exemple ;
- l'impact du changement climatique et les préoccupations environnementales. Le changement climatique va avoir un impact de plus en plus important sur l'environnement de nos ouvrages : accroissement des périodes d'étiages, de sécheresse ou bien de hautes eaux, augmentation potentielle de la fréquence et de l'ampleur des événements extrêmes... La conséquence en sera, sur les ouvrages en sites aquatiques, une probable augmentation de l'intensité et de la répétition des mécanismes de détérioration par affouillement et érosion. Cela nécessite donc de mieux comprendre l'impact des sollicitations nouvelles ou répétées notamment sur un parc d'ouvrages anciens : vulnérabilité, évaluation des risques, gestion, adaptation, résilience... Par ailleurs, les questions autour des économies de ressources (matériaux, énergie) et du développement durable imposent également de développer de nouvelles méthodes de renforcement ou de conception et réalisation des ouvrages.

Sans que cela soit exhaustif, je détaillerai 3 exemples d'axes de travail en cours ou à potentiellement mener pour illustrer ces approches en réponse à des « questions de recherche ».

Un premier axe de travail en cours de réalisation dans la thèse de Dalia Ayssami concerne l'analyse des phénomènes d'érosion interne sur les digues fluviales, en adoptant une combinaison hybride de méthodes expérimentales et numériques.

Le travail de recherche doit, dans un premier temps, améliorer la compréhension des phénomènes d'érosion interne à partir d'essais de laboratoires, à la suite des travaux déjà réalisés. Cette partie de la thèse conduira à l'étude de différents sols de digues en laboratoire afin d'en retirer les principales caractéristiques et paramètres utiles à leurs modélisations numériques, notamment à l'échelle de l'ouvrage. Outre le développement de procédés expérimentaux permettant de visualiser les phénomènes, il sera surtout question d'étudier l'effet des hétérogénéités sur le comportement et les caractéristiques physiques des sols testées. Ainsi l'étude des sols à différents états de compacité ou différents états hydriques initiaux pourra compléter l'évaluation globale de la vulnérabilité rapportée à l'échelle de l'ouvrage. L'idée principale sera d'évaluer le jeu de paramètres physiques pertinents pour l'analyse des mécanismes d'érosion interne et de probabilité de démarrage

du phénomène. L'analyse se fera pour les sols dans les conditions de mise en œuvre initiales mais devra également se faire sur des matériaux « vieilliss » par application de plusieurs cycles hydriques.

Dans un second temps, le travail se concentrera sur la modélisation numérique de l'ouvrage. La recherche devra prendre en compte les propriétés physiques des matériaux telles qu'elles ont pu être observées en laboratoire, à des modèles par éléments finis sur COMSOL et/ou par éléments discrets sur YADE (logiciel "open source"). La thèse devra permettre de développer les supports numériques permettant de simuler le risque de départ d'un mécanisme d'érosion interne et d'établir un « coefficient de sécurité » pour ce mécanisme de rupture avec une réflexion spécifique sur la manière optimale de restituer le résultat de la modélisation numérique. Le travail pourra débuter par la modélisation des phénomènes à l'échelle de l'éprouvette puis continuera à l'échelle de l'ouvrage. À ce stade, l'objectif identifié est de modéliser le comportement de l'ouvrage à l'état initial et son évolution dans le temps sous l'effet de son vieillissement (en intégrant notamment les variations hydriques suspectées au fil du temps et le risque de fissuration par dessiccation), avec l'idée de définir la probabilité de démarrer un mécanisme d'érosion interne en simulant l'évolution dans le temps des propriétés de l'ouvrage.

La possibilité de mener une analyse plus complexe combinant éventuellement plusieurs mécanismes de rupture dans le cadre de scénarios de rupture pourra s'envisager selon la pertinence des premiers résultats. L'analyse de la stabilité vis-à-vis des mécanismes d'érosion interne pourra être confrontée à des retours d'expériences, menés et/ou documentés sur des ouvrages en vraie grandeur.

Un deuxième axe de travail possible concerne la prise en compte des effets cumulés de l'érosion par suffusion et des sollicitations cycliques sur les sols dans la déstabilisation potentielle des piles de pont par affouillement.

Ce travail démarre par le constat que certaines catastrophes dues à l'affouillement ne se produisent pas nécessairement lorsque le niveau d'eau est le plus élevé, mais aussi avec des niveaux plus bas, par exemple lorsque la durée d'exposition est longue et/ou le niveau d'eau fluctue. Dans ce contexte, probablement amplifié par le changement climatique, une question peu traitée est celle de l'affaiblissement des ponts par la combinaison des processus lents d'érosion et des charges de trafic en particulier dans les zones urbaines.

Une voie d'exploration possible est d'avoir une approche expérimentale multi-échelle en France et, éventuellement, au Japon. Comme déjà présentée, l'érosion par suffusion des sols est un mécanisme connu d'affaiblissement des matériaux notamment dans le cadre de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques. L'endommagement des sols (notamment leur liquéfaction) par des sollicitations cycliques est aussi un sujet d'étude actuel. Peu de travaux concernent cependant l'interaction entre ces 2 phénomènes qui est pourtant très probablement à l'origine de l'affaiblissement de plusieurs piles de ponts en rivière. Il est donc nécessaire d'étudier l'effet combiné de ces 2 processus.

Cela peut se faire, dans un premier temps, par l'utilisation de dispositifs expérimentaux adaptés pour caractériser les phénomènes de suffusion en rivière. En effet si la suffusion est bien comprise dans un volume de sol traversé par un écoulement, peu d'études existent dans une configuration où l'écoulement a lieu à la surface de ce sol saturé comme en rivière (que nous pourrions appeler « suffusion d'interface »).

Dans un deuxième temps, des essais triaxiaux en laboratoire combinant essais de suffusion (classiques) et chargement cyclique à différentes fréquences pourront être utilisés

pour caractériser la combinaison des deux phénomènes sur des sols et mélanges de sols identiques à ceux utilisés pour les essais de « suffusion d'interface ».

Des essais de modèle réduit en canal (modélisation à l'échelle) devront être envisagés à la suite. Ils viseraient à reproduire les effets de la « suffusion d'interface » au voisinage d'une pile de pont instrumentée et de suivre son comportement à l'aide de plusieurs mesures : capteurs de forces, réponse vibratoire... en étudiant la transposition des processus et lois observées précédemment dans une situation de modèle réduit.

Une dernière phase du travail consisterait à prendre en considération les données d'incident ou d'accident survenus sur sites réels en France et au Japon pour analyser l'apport des travaux menés qualitativement puis, dans la mesure du possible, quantitativement (loi d'échelle).

Un troisième axe de travail possible concerne le développement d'une méthodologie de détection des affouillements par instrumentation vibratoire et intelligence artificielle.

La surveillance des structures, notamment des ponts, est un enjeu particulièrement important pour les gestionnaires. Les développements récents sur le suivi de ces ouvrages portent sur leurs instrumentations en continu, en particulier vibratoire, en soulevant plusieurs questions : instrumentation plus ou moins massive, bas coût, potentiel de suivi de défauts, détection de situations à risque ou de crise... En parallèle et dans le cas où une quantité importante de données est générée, les outils d'intelligence artificielle ont montré, malgré de nombreuses questions ouvertes, une certaine capacité à suivre les défauts structurels ou les changements de conditions aux limites.

Il convient donc de poursuivre les efforts de recherche sur l'utilisation combinée des méthodes d'instrumentation en continu et de l'intelligence artificielle (de type "machine learning", analyse en composantes principales pour certaines variables, "deep learning" pour les séries temporelles) pour la détection et le suivi des affouillements.

Face au manque potentiel de données terrain en nombre, une démarche d'acquisition massive de données variées issues d'instrumentation sur structures en milieu contrôlé (modélisation physique, hydraulique ou non) peut être menée. Les situations les plus diverses devront alors être envisagées : typologie de structures, affouillements plus ou moins prononcés, régimes d'écoulement... Différents algorithmes de "machine learning" appliqués aux données mesurées pourront alors être utilisés et comparés pour leur capacité à suivre spécifiquement les affouillements dans ce contexte. Après un recensement des données terrain disponibles, la méthodologie développée pourra être extrapolée dessus.

Je conclurai ce manuscrit sur les perspectives de recherche pour l'optimisation du suivi des ouvrages fluviaux (ponts, digues et berges) mais également maritimes (quai, digues, structures offshores).

En effet, la surveillance continue de la santé des structures (SHM - Structural Health Monitoring) en contact avec un cours d'eau ou en milieu marin pose des problèmes spécifiques liés à l'environnement complexe de ces structures (courant, houle et mobilité des sédiments). Une surveillance continue efficace, détaillée et optimisée de ces ouvrages permettrait cependant une meilleure évaluation de leur état d'endommagement, une réévaluation de leur durée de vie et de possibles alertes en temps réel. Néanmoins, la question de la robustesse et de l'utilisation de ces nombreuses données de manière performante et pratique se pose, ainsi que celle du rapport coût-bénéfice de cette instrumentation pour les gestionnaires.

C'est dans ce contexte que des suites aux projets présentés dans ce manuscrit ont été étudiées. Associant nécessairement des partenaires aux profils variés (équipes de recherche des différentes spécialités, concepteurs et fournisseurs de capteurs, gestionnaires publics ou privés), ces suites pourraient prendre la forme d'un large programme de recherche et développement incluant :

- une analyse opérationnelle des situations initiales et des améliorations possibles des dispositifs d'instrumentation pour une meilleure évaluation en continu des performances des structures en relation avec leurs modes potentiels de défaillance (associés à leur environnement : eau, atmosphère...);
- le développement de capteurs, méthodes de mesures et modélisation à l'échelle « élémentaire » (sols et (géo)matériaux, éléments structuraux, eau statique ou dynamique...) et en situation modèle (expériences de laboratoire ou numériques, sur matériaux contrôlés, canaux d'essais);
- des mesures de terrain « classiques » mais aussi innovantes (reconnaissance et suivi en continu) pour les structures en terre, les ponts et les cours d'eau (« reflétés » par l'approche mentionnée ci-dessus) sur 1 à 3 sites pilotes (nouveaux ou existants), idéalement sur un seul segment de rivière densément surveillé et instrumenté;
- diverses analyses sur la quantité massive de données acquises, notamment : fusion de données géotechniques et géophysiques, reconstruction de la bathymétrie à partir de mesures de vitesse et de profondeur d'eau par méthode numérique inverse, analyse croisée des données pour les structures dans leur environnement (rivière et atmosphère) et leurs modes potentiels de défaillance, utilisation de la théorie de la Valeur de l'Information (VoI);
- le transfert des connaissances et des technologies développées aux utilisateurs finaux (gestionnaires et propriétaires de structures, ingénierie).

Bibliographie

- [1] R. Albert and A.-L. Barabási. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1):47–97, jan 2002.
- [2] M. Alipour, D. K. Harris, L. E. Barnes, O. E. Ozbulut, and J. Carroll. Load-capacity rating of bridge populations through machine learning: Application of decision trees and random forests. *Journal of Bridge Engineering*, 22(10), oct 2017.
- [3] ASTM. *D4647-06, Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [4] ASTM. *D6572, Standard Test Method for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test, Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [5] T. Badinier, J. de Sauvage, B. Ouzzine, F. Szymkiewicz, P. Reiffsteck, Y. Delerablée, and C. Minatchy. Energy geostructure: experimental and numerical modelling of thermal behaviour and interaction within the city underground. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pages 1–20, mar 2023.
- [6] M. T. Balhoff and K. E. Thompson. Modeling the steady flow of yield-stress fluids in packed beds. *AIChE Journal*, 50(12):3034–3048, 2004.
- [7] C. Barrington-Leigh and A. Millard-Ball. The world’s user-generated road map is more than 80% complete. *PLOS ONE*, 12(8):e0180698, aug 2017.
- [8] R. Beguin, P. Philippe, and Y.-H. Faure. Pore-scale flow measurements at the interface between a sandy layer and a model porous medium: Application to statistical modeling of contact erosion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(1):1–11, jan 2013.
- [9] F. Bell. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4):223–237, jul 1996.
- [10] M. G. Bell, F. Kurauchi, S. Perera, and W. Wong. Investigating transport network vulnerability by capacity weighted spectral analysis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 99:251–266, may 2017.
- [11] M. Belmokhtar. *Modélisation, analyse et apprentissage statistique du comportement dynamique des structures pour le suivi des conditions aux limites : application au phénomène d’affouillement*. PhD thesis, Paris Est Sup, 2022.

- [12] M. Belmokhtar, A. Bonnot, F. Schmidt, C. Chevalier, and A. Ture Savadkoohi. Revisited frequency domain decomposition for vibration monitoring of a bridge subjected to scour. In *ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, Sept. 2022.
- [13] M. Belmokhtar, F. Schmidt, A. Ture Savadkoohi, and C. Chevalier. Scour monitoring of a bridge pier through eigenfrequencies analysis. *SN Applied Sciences*, 3(3):303, 2021.
- [14] M. Belmokhtar, F. Schmidt, A. Ture Savadkoohi, and C. Chevalier. Piles de ponts soumis aux affouillements: Vibrations rigides des structures en interaction avec des sols élastiques. In *15ème Colloque National en Calcul des Structures (CSMA)*, Giens, France, May 2022.
- [15] N. Benahmed and S. Bonelli. Investigating concentrated leak erosion behaviour of cohesive soils by performing hole erosion tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(1):43–58, jan 2012.
- [16] A. Benamar, T. Karoui, A. Bennabi, A. Seghir, and H. Wang. Influence of fine particles on internal erosion of sandy soils. In *Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6)*, Paris, France, Aug. 2012.
- [17] F. Bendahmane, D. Marot, and A. Alexis. Parametric study of suffusion and backward erosion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(1):57–67, 2008.
- [18] A. M. Bento, A. Gomes, T. Viseu, L. Couto, and J. P. Pêgo. Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations. *Engineering Structures*, 223:111115, nov 2020.
- [19] S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez, and D. Hwang. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4-5):175–308, feb 2006.
- [20] G. Boeing. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65:126–139, sep 2017.
- [21] S. Bonelli and O. Brivois. The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(13):1573–1595, sep 2008.
- [22] N. Boujia. *Vulnérabilité des ouvrages d’art aux risques d’affouillement des fondations*. PhD thesis, Univ Paris Est, 2018.
- [23] N. Boujia, F. Schmidt, C. Chevalier, D. Siegert, and D. Pham van Bang. Effect of scour on the natural frequency responses of bridge piers: Development of a scour depth sensor. *Infrastructures*, 4(2), 2019.
- [24] N. Boujia, F. Schmidt, C. Chevalier, D. Siegert, and D. Pham Van Bang. Distributed optical fiber-based approach for soil-structure interaction. *Sensors*, 20(1), 2020.

- [25] N. Boujia, F. Schmidt, C. Chevalier, D. Siegert, and D. Pham Van Bang. Using rocking frequencies of bridge piers for scour monitoring. *Structural Engineering International*, 31:286–294, 2020.
- [26] N. Boujia, F. Schmidt, D. Siegert, D. Pham Van Bang, and C. Chevalier. Modelling of a bridge pier subjected to scour. *Procedia Engineering*, 199:2925–2930, 2017. 10th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN), Sapienza Univ Rome, Fac Civil & Ind Engn, Rome, ITALY, SEP 10-13, 2017.
- [27] L. Brandimarte, P. Paron, and G. Di Baldassarre. Bridge pier scour : A review of processes, measurements and estimates. *Environmental Engineering and Management Journal (EEMJ)*, 11(5), 2012.
- [28] L. Breiman. Random forests. *Machine Learning*, 45(1):5–32, 2001.
- [29] J. Briaud. Case histories in soil and rock erosion: Woodrow wilson bridge, brazos river meander, normandy cliffs and new orleans levees. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134, 2008.
- [30] J. Briaud, M. Bernhardt, and M. Leclair. The pocket erodometer test: Development and preliminary results. *Geotechnical Testing Journal*, 35(2), 2012.
- [31] J.-L. Briaud, H. Chen, K. Kwak, S.-W. Han, and F. Ting. Multiflood and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(2):105–113, 2001.
- [32] J.-L. Briaud, F. C. K. Ting, H. C. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu, and G. Wei. SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(4):237–246, apr 1999.
- [33] R. Brincker and C. E. Ventura. *Introduction to Operational Modal Analysis*. John Wiley & Sons, Ltd, aug 2015.
- [34] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3):441–445, jun 2001.
- [35] British Highways Agency. *The assessment of scour and other hydraulic actions at highway structures(BD97/12). 3(Part 21), 54*. British Highways Agency, 2012.
- [36] G. Brunner. *HEC-RAS river analysis system: Hydraulic reference manual, Version 5.0*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 2016.
- [37] J. Cattan and J. Mohammadi. Analysis of bridge condition rating data using neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 12(6):419–429, nov 1997.
- [38] Cerema. *Analyse de risque des ponts en site affouillable*. Cerema, 2019.
- [39] CFBR (ouvrage collectif). *Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai*. CFBR, 2021.

- [40] I. Charles, G. Herrier, C. Chevalier, and E. Durand. An experimental full-scale hydraulic earthen structure in lime treated soil. In *Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6)*, pages 181–188, Paris, France, Aug. 2012.
- [41] I. Charles, G. Herrier, C. Chevalier, E. Durand, D. Puiatti, J. Fleureau, S. Taibi, S. Bonelli, and J. Fry. A real scale experimental dike in lime-treated soil : Evaluation of the methodology, mechanical and hydraulic performance. In *Seventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE-7)*, pages 521–527, Perth, Australia, Dec. 2014.
- [42] G. G. Chase and P. Dachavijit. A correlation for yield stress fluid flow through packed beds. *Rheologica Acta*, 44(5):495–501, apr 2005.
- [43] T. Chen and C. Guestrin. XGBoost. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. ACM, aug 2016.
- [44] N.-S. Cheng. Power-law index for velocity profiles in open channel flows. *Advances in Water Resources*, 30(8):1775–1784, aug 2007.
- [45] C. Chevalier. *Dynamique et instabilités des interfaces grains/fluide dans mes suspensions non-Browniennes*. PhD thesis, Univ Paris 6, 2006.
- [46] C. Chevalier, M. Ben Amar, D. Bonn, and A. Lindner. Inertial effects on Saffman-Taylor viscous fingering. *Journal of Fluid Mechanics*, 552:83–97, 2006.
- [47] C. Chevalier and S. Bonelli, editors. *Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques, Méthodologie de caractérisation au laboratoire*. Presse des Ponts et Chaussées, 2017.
- [48] C. Chevalier, I. Haghghi, G. Herrier, and I. Charles. Resistance to erosion of lime treated soils : a complete parametric study in laboratory. In *Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6)*, pages 161–168, Paris, France, Aug. 2012.
- [49] C. Chevalier, I. Haghghi, T. Pham, and P. Reiffsteck. Two complementary tests for characterizing the soil erosion. In *Fifth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5)*, ASCE, *Geotechnical Special Publication No. 210*, San Francisco, USA, Nov. 2010.
- [50] C. Chevalier, G. Herrier, and I. Charles. Resistance to erosion of limetreated soils. In *16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI ECSMGE)*, pages 2773–2779, Edinburgh, UK, Sept. 2015.
- [51] C. Chevalier and F. Larrarte. Real time instability of flow close to a scour affected abutment. *Environmental Fluid Mechanics*, 22:495–510, feb 2022.
- [52] C. Chevalier, F. Larrarte, H. Chollet, F. Schmidt, M. Belmokhtar, L. Battist, C. Wintenberger, and J. Jacques. Scour monitoring on bridge pier: two French returns on experience. In *Eleventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE-11)*, Copenhagen, Denmark, Sept. 2023.

- [53] C. Chevalier, F. Larrarte, F. Schmidt, H. Chollet, E. Durand, D. Pham-Van-Bang, A. Bontemps, P. Sergent, P. Gondret, C. Morize, S. De La Roque, and M. Cheetham. A review of Soils, Structures and Hydraulics: Expertise and Applied Research (SSHEAR) project. In *Tenth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-10)*, Virtual, Oct. 2021.
- [54] C. Chevalier, A. Lindner, and E. Clement. Destabilization of a Saffman-Taylor fingerlike pattern in a granular suspension. *Physical Review Letters*, 99(17):174501, 2007.
- [55] C. Chevalier, A. Lindner, M. Leroux, and E. Clement. Morphodynamics during air injection into a confined granular suspension. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 158(1-3, SI):63–72, 2009.
- [56] C. Chevalier and F. Meunier. Environmental assessment of biogas co- or tri-generation units by life cycle analysis methodology. *Applied Thermal Engineering*, 25(17-18):3025–3041, 2005.
- [57] C. Chevalier, D. Pham-Van-Bang, E. Durand, D. Pham-Van-Bang, I. Charles, and G. Herrier. Scour and erosion phenomena occurring in waterways - recent advances (keynote lecture). In *Seventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE-7)*, pages 33–48, Perth, Australia, Dec. 2014.
- [58] T. Chevalier. *Ecoulements de fluides à seuil en milieux confinés*. PhD thesis, Univ Paris Est, 2013.
- [59] T. Chevalier, C. Chevalier, X. Clain, J. C. Dupla, J. Canou, S. Rodts, and P. Coussot. Darcy's law for yield stress fluid flowing through a porous medium. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 195:57–66, 2013.
- [60] T. Chevalier, P. F. Faure, C. Chevalier, P. Coussot, and S. Rodts. Velocity distributions in confined flows of some complex fluids: Sequence, sample and hardware issues. *Journal of Magnetic Resonance*, 245:156–170, 2014.
- [61] T. Chevalier, S. Rodts, X. Chateau, C. Chevalier, and P. Coussot. Breaking of non-newtonian character in flows through a porous medium. *Physical Review E*, 89(2):023002, 2014.
- [62] T. Chevalier, S. Rodts, C. Chevalier, and P. Coussot. Quantitative exploitation of PFG NMR and MRI velocimetry data for the rheological study of yield stress fluid flows at macro- and micro-scales in complex geometries. *Experiments in Fluids*, 56(1):1–16, 2015.
- [63] Ciria. *The International Levee Handbook*. CIRIA, 2013.
- [64] Ciria-Cerema. *Guide internationale sur les digues, "The International Levee Handbook, 2013"*. Cerema, 2019.
- [65] X. Clain. *Etude expérimentale de l'injection de fluides d'Herschel-Bulkley en milieu poreux*. PhD thesis, Univ Paris Est, 2010.

- [66] D. Coles. The law of the wake in the turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 1(2):191–226, 1956.
- [67] C. Cortes and V. Vapnik. Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3):273–297, sep 1995.
- [68] O. Cuisinier, F. Masrouri, and A. Mehenni. Alteration of the hydromechanical performances of a stabilized compacted soil exposed to successive wetting–drying cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(11):04020349, nov 2020.
- [69] M. De Baecque. *Caractérisation multi-physique et étude de la durabilité des sols traités à la chaux en vue d’une application aux digues maritimes*. PhD thesis, Univ Paris Est, 2019.
- [70] M. De Baecque, C. Chevalier, M. Le Feuvre, S. Palma Lopes, and P. Reiffsteck. Influence of sea water and wetting-drying cycles on the erosion of a lime treated soil: perspectives to marine dike improvement. In *Tenth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-10)*, Virtual, Oct. 2021.
- [71] E. L. de Oliveira, L. da Silva Portugal, and W. P. Junior. Indicators of reliability and vulnerability: Similarities and differences in ranking links of a complex road system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 88:195–208, jun 2016.
- [72] R. du Plooy, S. P. Lopes, G. Villain, and X. Dérobert. Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT & E International*, 54:27–36, 2013.
- [73] T. M. S. Elhag and Y.-M. Wang. Risk assessment for bridge maintenance projects: Neural networks versus regression techniques. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 21(6):402–409, nov 2007.
- [74] W. Emerson. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research*, 2:211–217, 1964.
- [75] T. Faisant, L. Peyras, C. Jeanniot, A. Tekatlian, S. Gendrey, C. Chevalier, M. De Baecque, A. Schleyer-Lindenmann, R. Bertoldo, C. De Paris, and T. Mallet. Projet de R&D DIGUE 2020 : réalisation d’une plateforme de recherche en site maritime pour l’étude des actions de la mer sur les digues, la durabilité, et la perception du risque de submersion. In *3ème colloque national Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions*, Aix-en-Provence, France, Mar. 2019.
- [76] T. Fawcett. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8):861–874, jun 2006.
- [77] R. Fell and J.-J. Fry, editors. *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*. CRC Press, may 2007.
- [78] R. Fellag. *Phénomènes d’érosion interne dans les graves et les sols grossiers : applications aux digues et aux barrages*. PhD thesis, Univ Paris Est, 2016.

- [79] S. Fischer. *Développement d'une instrumentation ultrasonore pour la mesure des vitesses des liquides au-delà de la limite de Nyquist par une approche spectrale*. PhD thesis, Univ Strasbourg, 2004.
- [80] E. Florens, C. Chevalier, F. Schmidt, F. Larrarte, and E. Durand. Scour monitoring on bridge pier - methodology and implementation. *E3S Web of Conferences*, 40:03020, 2018.
- [81] R. Flores-Berrones, M. Ramírez-Reynaga, and E. J. Macari. Internal erosion and rehabilitation of an earth-rock dam. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(2):150–160, feb 2011.
- [82] M. Forde, D. McCann, M. Clark, K. Broughton, P. Fenning, and A. Brown. Radar measurement of bridge scour. *NDT & E International*, 32(8):481–492, dec 1999.
- [83] M. Foster, R. Fell, and M. Spannagle. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5):1000–1024, 2000.
- [84] D. François, P. Meriaux, and J. Monnet, editors. *Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques, Méthodologie de reconnaissance et de diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydrauliques en remblai*. Presse des Ponts et Chaussées, 2013.
- [85] J. Fry, A. Vogel, P. Royet, and J. Courivaud. Dam failures by erosion: lessons from erinoh data bases. In *Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6)*, Paris, France, Aug. 2012.
- [86] Y. Guney, D. Sari, M. Cetin, and M. Tunçan. Impact of cyclic wetting–drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Building and Environment*, 42(2):681–688, feb 2007.
- [87] I. Haghghi. *De la suffusion à l'affouillement des ouvrages géotechniques : développement des phénomènes d'érosion et de dispersion dans les sols*. PhD thesis, Univ Paris Est, 2012.
- [88] I. Haghghi, C. Chevalier, M. Duc, S. Guedon, and P. Reiffsteck. Improvement of hole erosion test and results on reference soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(2):330–339, 2013.
- [89] I. Haghghi, T. Martin, P. Reiffsteck, M. Duc, F. Szymkiewicz, and C. Chevalier. An automated crumb test procedure to estimate the soil disaggregation properties in contact with water. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(10):4416–4431, dec 2022.
- [90] G. Hanson. Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillway. *Transaction of ASAE*, 34(5):2015–2020, 1991.
- [91] G. J. Hanson and K. R. Cook. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(4):455–462, 2004.

- [92] M. Heidarpour, H. Afzalimehr, and E. Izadinia. Reduction of local scour around bridge pier groups using collars. *International Journal of Sediment Research*, 25(4):411–422, dec 2010.
- [93] S. Hemmati, M. De Baecque, and C. Chevalier. Modélisation numérique des cycles hydriques sur un échantillon d'un sol traité à la chaux. In *11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Lyon, France, June 2022.
- [94] P. Henensal. Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux: Les protections végétales et structurelles des surfaces et des pentes. *Études et recherches des LPC, Série Géotechnique*, GT54, 1993.
- [95] P. Henensal and F. Duchatel. L'érodimètre à jets mobiles. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 167:47–53, 1990.
- [96] G. Herrier, D. Puiatti, C. Chevalier, M. Froumentin, S. Bonelli, and J.-J. Fry. Lime treatment: New perspectives for the use of silty and clayey soils in earthen hydraulic structures. *Wasserwirtschaft*, 103(5):112–115, 2013.
- [97] W. H. Herschel and R. Bulkley. Konsistenzmessungen von gummi-benzollösungen. *Kolloid-Zeitschrift*, 39(4):291–300, aug 1926.
- [98] S. Ientile, G. Bianne, C. Chevalier, F. Schmidt, M. Rasol, A. Orcesi, L. Adelaide, and B. Nedjar. Measuring road network resilience by loss of serviceability index for critical road links. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, pages 1–12, jun 2022.
- [99] A. Jerez, C. Chevalier, and F. Larrarte. Erosion measurement on immersed situations : a state of the art. In *Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6)*, pages 112–119, Paris, France, Aug. 2012.
- [100] O. Johnsen, C. Chevalier, A. Lindner, R. Toussaint, E. Clement, K. J. Maloy, E. G. Flekkoy, and J. Schmittbuhl. Decompaction and fluidization of a saturated and confined granular medium by injection of a viscous liquid or gas. *Physical Review E*, 78(5, 1):051302, 2008.
- [101] B. H. Koh, P. Dharap, S. Nagarajaiah, and M. Q. Phan. Real-time structural damage monitoring by input error function. *AIAA Journal*, 43(8):1808–1814, aug 2005.
- [102] F. Lachaussée, D. Pham Van Bang, V. Vidal, C. Chevalier, O. Ndoye, F. Szymkiewicz, C. Minatchy, F. Martineau, and K. Watanabe. Overflow erosion on mixed kaolin-sand embankments. In *Eighth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-8)*, pages 653–658, Oxford, UK, Sept. 2016.
- [103] T. Lan, W. Xu, S. Zhao, F. Liu, and Y. Liu. Advances in vibration-based scour monitoring for bridge foundations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203(2):022127, nov 2021.

- [104] F. Larrarte, C. Chevalier, L. Battist, and H. Chollet. Hydraulics and bridges: A French case study of monitoring of a bridge affected by scour. *Flow Measurement and Instrumentation*, 74:101783, 2020.
- [105] F. Larrarte, C. Chevalier, H. Cholet, F. Schmidt, M. Belmokhtar, and C. Wintemberger. Monitoring of real sites affected by scour: Observation, analysis and feedback of field data. In *39th IAHR World congress*, Granada, Spain, June 2022.
- [106] F. Larrarte, C. Chevalier, C. Minatchy, and H. Chollet. PUMP Erosion Test : an erodimeter for field studies. In *Eleventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE-11)*, Copenhagen, Denmark, Sept. 2023.
- [107] Z. Liu, G. Gilbert, J. M. Cepeda, A. O. K. Lysdahl, L. Piciullo, H. Hefre, and S. Lacasse. Modelling of shallow landslides with machine learning algorithms. *Geoscience Frontiers*, 12(1):385–393, jan 2021.
- [108] S. Lundberg and S.-I. Lee. A unified approach to interpreting model predictions. In *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*, 2017.
- [109] D. Marot, P.-L. Regazzoni, and T. Wahl. Energy-based method for providing soil surface erodibility rankings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12):1290–1293, dec 2011.
- [110] A. Mehenni, O. Cuisinier, and F. Masrouri. Impact of lime, cement, and clay treatments on the internal erosion of compacted soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9):04016071, sep 2016.
- [111] B. Melville and S. Coleman. *Bridge scour*. Water Resources Publications, 2000.
- [112] L. Ménard, G. Bourdon, and M. Gambin. Méthode générale de calcul d’un rideau ou d’un pieu sollicité horizontalement en fonction des résultats pressiométriques. *Sols Soils*, 22–23, 1969.
- [113] P. Meriaux, P. Royet, and C. Folton. *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations: guide pratique à l’usage des propriétaires et des gestionnaires*. Cemagref Éditions, 2004.
- [114] R. Moffat, R. J. Fannin, and S. J. Garner. Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(3):399–412, mar 2011.
- [115] O. Ndoeye, C. Chevalier, P. Reiffsteck, C. Minatchy, S. Fanelli, and D. Pham Van Bang. Development of a new submersible test to characterise the erosion of soils and sediments. In *Eighth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-8)*, pages 1011–1017, Oxford, UK, Sept. 2016.
- [116] M. Newman. *Networks*. Oxford University Press, mar 2010.
- [117] B. Ouzzine, J. de Sauvage, M. Blanc, P. Reiffsteck, S. Hemmati, T. Badinier, T. Dubreucq, and C. Chevalier. Scaling laws for the modelling of energy geostructures scaling laws for the modelling of energy geostructures. *submitted to International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2023.

- [118] H. Pascal. Nonsteady flow of non-newtonian fluids through a porous medium. *International Journal of Engineering Science*, 21(3):199–210, jan 1983.
- [119] P. L. Pasternak. *On a New Method of Analysis of an Elastic Foundation by Means of Two Foundation Constants*. Gosudarstvennoe Izdatelstro Liberaturi po Stroitelstvui Arkhitekture, Moscow, 1954.
- [120] T. L. Pham. *Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide*. PhD thesis, ENPC, 2008.
- [121] J. R. Philip. The theory of infiltration: 1 the infiltration equation and its solutions. *Soil Science*, 83(5):345–358, may 1957.
- [122] L. Prendergast and K. Gavin. A review of bridge scour monitoring techniques. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2):138–149, 2014.
- [123] L. Prendergast, D. Hester, K. Gavin, and J. O’Sullivan. An investigation of the changes in the natural frequency of a pile affected by scour. *Journal of Sound and Vibration*, 332(25):6685–6702, dec 2013.
- [124] M. Rasol, F. Schmidt, S. Ientile, L. Adelaide, B. Nedjar, M. Kane, and C. Chevalier. Progress and monitoring opportunities of skid resistance in road transport: A critical review and road sensors. *Remote Sensing*, 13(18):3729, sep 2021.
- [125] J. Rayleigh. *The Theory of Sound*. Dover Corporation, Downers Grove, IL, USA, 1945.
- [126] P. Reiffsteck, I. Haghighi, and C. Chevalier. Erodibility diagnostic of existing hydraulic earthworks by mobile jets erosion test. In *Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6)*, pages 166–173, Paris, France, Aug. 2012.
- [127] B. L. Runigo, V. Ferber, Y. Cui, O. Cuisinier, and D. Deneele. Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions. *Engineering Geology*, 118(1-2):20–28, feb 2011.
- [128] Y. Sail, D. Marot, L. Sibille, and A. Alexis. Suffusion tests on cohesionless granular matter. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(5):799–817, jan 2011.
- [129] B. Salavati, M. Cheetham, L. Mellal, A. Siduron, and C. Pams. Development of an integrated approach to select structures at risk from scour erosion. In *Georail International Symposium*, Paris, France, 2017.
- [130] SETRA. *Guide d’application de l’instruction technique pour la surveillance et l’entretien des ouvrages d’art - Fondations en site aquatique*. 2013.
- [131] SETRA-LCPC. *Fondations de ponts en site aquatique en état précaire*. 1980.
- [132] L. M. Shakou, J.-L. Wybo, G. Reniers, and G. Boustras. Developing an innovative framework for enhancing the resilience of critical infrastructure to climate change. *Safety Science*, 118:364–378, oct 2019.

- [133] H. Shan, A. Wagner, K. Kerenyi, J. Guo, and Z. Xie. An ex-situ scour testing device for erosion research of cohesive soils. In *Proceedings of the engineering mechanics institute 2011 conference*, pages 1020–1027, Boston, MA, 2011.
- [134] J. Sherard, L. Dunnigan, and R. Decker. Identification and nature of dispersive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 102(4):187–301, 1976.
- [135] SNCF. *Cotation des ouvrages d'art Livret A - fondation en site aquatique*. SNCF, 2005.
- [136] H. Soh, S. Lim, T. Zhang, X. Fu, G. K. K. Lee, T. G. G. Hung, P. Di, S. Prakasham, and L. Wong. Weighted complex network analysis of travel routes on the singapore public transportation system. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(24):5852–5863, dec 2010.
- [137] B. J. Soller, D. K. Gifford, M. S. Wolfe, and M. E. Froggatt. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies. *Optics Express*, 13(2):666, 2005.
- [138] T. Sturm, R. Ettema, and B. Melville. *Evaluation of Bridge-Scour Research: Abutment and Contraction Scour Processes and Prediction*. NCHRP, Web-Only Document 181, 2011.
- [139] T. Takayanagi, E. Durand, D. Davi, C. Chevalier, M. Cheetham, N. Naito, T. Sanagawa, and K. Watanabe. Scour risk management at bridges - a comparison of japanese and french scoring methodologies. In *12th World Congress on Railway Research (WARR)*, Tokyo, Japan, Oct. 2019.
- [140] T. Takayanagi, N. Naito, R. Manome, and O. Nunokawa. Evaluation method using score table for identifying bridge piers vulnerable to scouring in japan. In *Ninth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-9)*, Taipei, Taiwan, Nov. 2018.
- [141] Q. Q. Truong. *Etude des mécanismes de blocage d'un écoulement par un produit de colmatage*. PhD thesis, Univ Paris Est, 2012.
- [142] Q. Q. Truong, J. Canou, J. C. Dupla, C. Chevalier, M. Chopin, and J. J. Fry. Water flow blocking process in permeable soils by injection of specific grouts. In *Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6)*, pages 224–231, Paris, France, Aug. 2012.
- [143] E. Tubaldi, L. Macorini, B. A. Izzuddin, C. Manes, and F. Laio. A framework for probabilistic assessment of clear-water scour around bridge piers. *Structural Safety*, 69:11–22, nov 2017.
- [144] O. Turhan. On the fundamental frequency of beams carrying a point mass: Rayleigh approximations versus exact solutions. *Journal of Sound and Vibration*, 230(2):449–459, feb 2000.

- [145] E. D. Vugrin, D. E. Warren, and M. A. Ehlen. A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane. *Process Safety Progress*, 30(3):280–290, mar 2011.
- [146] C. Wan and R. Fell. Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test, uniciv report, no. r-412. Technical report, 2002.
- [147] C. F. Wan and R. Fell. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4):373–380, apr 2004.
- [148] C. F. Wan and R. Fell. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(3):401–407, mar 2008.
- [149] C. Wang, X. Yu, and F. Liang. A review of bridge scour: mechanism, estimation, monitoring and countermeasures. *Natural Hazards*, 87:1881–1906, 2017.
- [150] T. Wang, P. Reiffsteck, C. Chevalier, C.-W. Chen, and F. Schmidt. An interpretable model for bridge scour risk assessment using explainable artificial intelligence and engineers’ expertise. *Structure and Infrastructure Engineering*, pages 1–13, jul 2023.
- [151] T. Wang, P. Reiffsteck, C. Chevalier, Z. Zhu, C.-W. Chen, and F. Schmidt. A novel extreme gradient boosting algorithm based model for predicting the scour risk around bridge piers: application to french railway bridges. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(3):1104–1122, May 2023.
- [152] Z. Wang, A. P. C. Chan, J. Yuan, B. Xia, M. Skitmore, and Q. Li. Recent advances in modeling the vulnerability of transportation networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 21(2), jun 2015.
- [153] K. Watanabe, F. Nakagawa, T. Sanagawa, and C. Chevalier. Hydraulic model test on destabilization process of river bridge pier caused by local scours. In *Eleventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE-11)*, Copenhagen, Denmark, Sept. 2023.
- [154] E. Winkler. *Theory of Elasticity and Strength of Materials*. Dominicus, Prague, Czechoslovakia, 1867.
- [155] Z. Ying, Y.-J. Cui, N. Benahmed, and M. Duc. Changes in microstructure and water retention property of a lime-treated saline soil during curing. *Acta Geotechnica*, 17(1):319–326, may 2021.
- [156] X. Yu and X. Yu. Laboratory evaluation of time-domain reflectometry for bridge scour measurement: Comparison with the ultrasonic method. *Advances in Civil Engineering*, 2010:1–12, 2010.

