

SSHEAR SOILS, STRUCTURES & HYDRAULICS Expertise and Applied Research

Journée publique de restitution Mercredi 11 Septembre 2019, Marne-la-Vallée

Instrumentation vibratoire des structures affouillables

Nissrine BOUJIA, Christophe CHEVALIER, Emma FLORENS, Frédérique LARRARTE, Franziska SCHMIDT, Dominique SIEGERT, *IFSTTAR, Université Paris Est*

Arnaud BONTEMPS, Edouard DURAND, CEREMA, Dter NC, Laboratoire de Blois Damien PHAM van BANG, Vincent VIDAL, CEREMA, Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant



Surveillance des affouillements

Solutions génériques de surveillance

- Outils géophysiques,
 - Radar,
 - Sonar,
 - Réflectométrie temporelle.



Solutions en présence d'un obstacle

- Outils avec repères,
 - Flotteurs,
 - Anneaux métalliques coulissants,
 - « Smart rocks ».



- Sensibilité aux matériaux en suspension,
- Difficulté du traitement et de l'interprétation des mesures,
- Difficulté de mise en place,
- Mesure ponctuelle.

F. Schmidt – Instrumentation vibratoire des structures affouillables – Journée de restitution ANR SSHEAR, 11/09/2019



Surveillance des affouillements

Solutions génériques de surveillance

- Outils géophysiques,
 - Radar,
 - Sonar,
 - Réflectométrie temporelle.



- Sensibilité aux matériaux en suspension,
- Difficulté du traitement et de l'interprétation des mesures,
- Difficulté de mise en place,
- Mesure ponctuelle.

F. Schmidt – Instrumentation vibratoire des structures affouillables – Journée de restitution ANR SSHEAR, 11/09/2019

- Solutions en présence d'un obstacle
 - Outils avec repères,
 - Flotteurs,
 - Anneaux métalliques coulissants,
 - « Smart rocks ».





- Techniques dynamiques.
 - Développement de capteurs spécifiques,
 - Suivi du comportement dynamique de la structure.



Bridge monitored with inclinometres (Foti & Sabia, 2011)



Approches







Développement d'un capteur d'affouillement

SUIVI INDIRECT DE L'AFFOUILLEMENT

Suivi vibratoire: approche expérimentale

- Influence du matériau de la tige: PVC et aluminium.
- Influence de la géométrie: deux géométries testées (circulaires creuses et plates).
- Influence de la longueur enfouie dans le sol.
- Influence du type de sol: non-cohésif (sable) et cohésif (mélange argile-sable).

Tiges	Géométrie	Longueur (mm)	Raideur à la flexion El (Nm²)	Masse volumique (kg/m³)
	Rectangulaire	600-800	0,8	2700
Tiges en aluminium	Circulaire creuse	600-800	31,1	2700
Tige en PVC	Circulaire creuse	800	11,0	1425





Dispositifs et protocoles expérimentaux

Essai dans le sable sec



- Variation de la hauteur libre H de la tige.
- Fréquence d'échantillonnage 512Hz
- Mesure de f₁de la tige dans la direction X tous les 5 cm.
- Mesure du taux d'amortissement.

Post-traitements (Fréquence)

Essai dans le mélange sableargile saturé



- Excitation par série de chocs.
- Essais à différentes échéances.
- Les tiges circulaires en aluminium ne sont pas testées.



Effet de l'affouillement



Essai dans le sable sec





 Essai dans le mélange sableargile



- Diminution de la première fréquence des tiges avec l'affouillement.
- Même H => Même fréquence.
- Diminution de la sensibilité des tiges avec la raideur à la flexion et la nature du sol.

Effet de la nature du sol

16



Comparaison fréquence (sable) VS (sable+argile)

- Fréquence dans le mélange <
 Fréquences dans le sable.
- Faible taux d'enfouissement => pas d'influence de la nature du sol.
- Grand enfouissement => fréquence dépendante de la nature du sol.



Technique de calibration





Modélisation numérique

- 1. L'effet de l'eau sur le capteur et la longueur équivalente ?
- 2. Les déformées modales, sont-elles modifiées avec l'affouillement ?



Paramètres matériaux

Maillage

Eléments de second ordre: Tétraèdres 10 nœuds.

Conditions de contact et aux limites

- Tige collée au sol au niveau de l'interface.
- Base encastrée.
- Face latérale bloquée dans la direction normale.



Modélisation numérique



- 1. L'effet de l'eau sur le capteur et la longueur équivalente ?
- 2. Les déformées modales, sont-elles modifiées avec l'affouillement ?



Paramètres matériaux

Maillage

Eléments de second ordre: Tétraèdres 10 nœuds.

Conditions de contact et aux limites

- Tige collée au sol au niveau de l'interface.
- Base encastrée.
- Face latérale bloquée dans la direction normale.



Tiges	CA	RA	СР
Ecart maximal (%)	3%	9%	3%

Prise en compte de l'eau



Evolution des déformées modales





- Mode de flexion.
- Sensibilité de la forme de la déformée modale à l'affouillement.
- Validité du modèle de poutre équivalente pour les déformées modales des tiges.







- Déformation maximale au niveau du sol => monitoring
- Augmentation des déformations au niveau des couches supérieures (10 cm)
- Pas d'effet de l'affouillement pour z > 10 cm.

Synthèse des travaux sur le suivi indirect de l'affouillement par mesures vibratoires



- Mise en avant de l'intérêt du suivi vibratoire d'une tige instrumentée en guise de capteur d'affouillement
 - Accélérations et déplacements,
 - Approches expérimentale, analytique, numérique,
 - Variation des différentes caractéristiques de la tige (matériau, section), sol (sable, mélange sable-argile), présence ou absence d'eau (statique),
 - Essais de répétabilité
 - Scour-Depth Sensor (SDS).
- Emergence d'une longueur de poutre encastrée-libre équivalente (modèle PELé)
 - Approche ingénieur,
 - Travaux actuels sur l'évaluation de cette longueur équivalente.





Evaluation de la profondeur d'affouillement in-situ

SUIVI DIRECT DE L'AFFOUILLEMENT

Etude(s) en canal hydraulique



Pile isolée (sable sec)



Pile isolée (en canal)



Piles avec tablier (en canal)



- Extraction manuelle symétrique du sol ou affouillement du sol par l'écoulement.
- Profondeur enfouie D = 25 cm à D = 5 cm.
- Excitation par impact de marteau ou par l'écoulement.
- f_e=25,6KHz.



Suivi des fréquences propres





Suivi de la première fréquence propre





Profondeur enfouie D (cm)

- Diminution de la première fréquence avec l'affouillement.
- Essai en canal : fréquence constante pour les premiers centimètres érodés.
- Diminution de la fréquence de 35 % avec le tablier.

Mode propre





Modèle proposé



Pile

• Poutre rigide.

• 2 degrés de liberté : translation x et rotation θ .

Sol

• Homogène.

- Ressorts linéaires élastiques horizontaux de raideur k_s.
- Ressort hélicoïdal de raideur K_r à la base de la pile.

Equilibre de la pile

$$\begin{cases} m\ddot{x} + \int_{-L}^{-L+D} k_s (x + \theta y) dy = 0, \\ J_{G} \ddot{\theta} + K_r \theta + \int_{-L}^{-L+D} k_s (x + \theta y) y dy = 0. \end{cases}$$

Solution

$$\begin{cases} x(t) = X \cos(\omega t + \varphi), \\ \theta(t) = \Theta \cos(\omega t + \varphi). \end{cases}$$

$$a\omega^4 + b_{(k_s, K_r)}\omega^2 + c_{(k_s, K_r)} = 0$$



Modèle numérique



7	900	

Elément	Module d'Young (MPa)	Masse volumique (Kg/m3)	Poisson (-)
Pile	40 000	2700	0,2
Sol	4,2	1700	0,3

Maillage

Eléments de second ordre: Tétraèdres 10 nœuds

Conditions de contact et aux limites

- Pile collée au sol au niveau de l'interface
- Base encastrée.
- Face latérale bloquée dans la direction normale.

Sortie du modèle

Fréquences propres + déformées modales



Expérimental vs numérique





- Bon accord entre les résultats expérimentaux et analytiques.
- Le modèle ne tient pas compte de la couche du sol moins dense en surface.

Piles avec tablier en canal hydraulique



Le tablier participe uniquement par sa masse.
 Chaque pile reprend la moitié du poids du tablier.





 Bon accord entre le modèle analytique et les résultats expérimentaux de la pile avec tablier.

Instrumentation d'un ouvrage: Ouvrage A71





Comportement dynamique: étude numérique





F. Schmidt – Instrumentation vibratoire des structures attouillables – Journee de restitution ANR SSHEAR, 11/09/2019

Comportement dynamique: étude numérique





Comportement dynamique: étude numérique





Première instrumentation





- Test du capteur d'affouillement,
- Mesure des accélérations en tête de pile P4: instrumentation courte durée (> 4 heures),
- Accéléromètres autonomes, bas coûts
 - + premier test avec
 - accéléromètres haute précision (PCB)

Instrumentation en cours





- 3 accéléromètres haute précision
 -> tête de pile de pont,
 - -> même section, sous tablier,
 - -> sous tablier, à 1/3 travée,
- Autres instrumentations: Vitesse hydraulique, bathymétrie, limnimètre, caméra (datalogger).

Conclusions



- Etude de faisabilité d'un capteur d'affouillement: scour-depth sensor
 Analytique, numérique, expériemntal
 Méthode de calibrage « ingénieur »
- Etude en laboratoire et in-situ de piles et d'ouvrages Etudes en canal hydraulique Instrumentation d'un ouvrage réel





- Boujia, Nissrine, Schmidt, Franziska, Chevalier, Christophe, Siegert, Dominique, Pham van Bang, Damien. Effect of Scour on the Natural Frequency Responses of Bridge Piers: Development of a Scour Depth Sensor, 2019, Infrastructures 2019, 4(2), 21.
- Boujia, Nissrine, Schmidt, Franziska, Chevalier, Christophe, Siegert, Dominique, Pham van Bang, Damien. Distributed optical fiber-based approach for soil-structure interaction, submitted to Sensors.
- Boujia, Nissrine, Schmidt, Franziska, Chevalier, Christophe, Siegert, Dominique, Pham van Bang, Damien. Using rocking frequencies of bridge piers for scour monitoring, submitted to Structural Engineering International.
- Nissrine Boujia, Franziska Schmidt, Christophe Chevalier, Dominique Siegert, Damien Pham van Bang, Modelling of a bridge pier subjected to scour, 10th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2017), 10-13 septembre 2017, Rome, Italie.
- Nissrine Boujia, Franziska Schmidt, Christophe Chevalier, Dominique Siegert, Damien Pham Van Bang, Bridge scour monitoring technique using the vibratory response of rods embedded in the riverbed, 7th Transport Research Arena TRA 2018, 16-19 Avril 2018, Vienna, Austria.



Merci de votre attention.

http://sshear.ifsttar.fr/



SSHEAR SOILS, STRUCTURES & HYDRAULICS Expertise and Applied Research

Modèles réduits de piles





Module d'Young	Masse volumique	Poisson	Elancement
(GPa)	(Kg/m3)	(-)	(-)
40	2700	0,2	5

