

CARACTÉRISATION DES FACTEURS INFLUENÇANT L'AFFOUILLEMENT LOCAL AUTOUR DES PILES DE PONT

CHARACTERIZATION OF FACTORS INFLUENCING LOCAL SCOUR AROUND BRIDGE PIERS

Réception : 19/10/2021

Acceptation : 29/11/2021

Publication : 05/01/2022

ANNAD Mohamed¹, LEFKIR Abdelouahab²

¹Laboratoire LTPiTE, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), Alger, Algérie.
Email : m.annad@enstp.edu.dz

²Laboratoire LTPiTE, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), Alger, Algérie.
Email : a.lefkir@enstp.edu.dz

Résumé - L'affouillement local des piles de pont est le résultat d'interaction entre l'écoulement, le sol et le pont. Il est défini comme étant un phénomène très complexe dépendant de nombreux paramètres, à savoir : paramètres physiques de l'écoulement, paramètres géotechniques et paramètres géométriques. La plupart des paramètres sont pris d'une manière empirique dans les formules de calcul où l'influence réelle de ces paramètres sur l'affouillement est rarement évoquée. Le choix empirique des paramètres peut entraîner une inexactitude dans l'estimation de l'affouillement. D'un autre côté, certains paramètres jugés comme faiblement corrélés avec l'affouillement, peuvent affecter inutilement la simplicité des formules en les rendant redondantes. L'objectif de cette étude est de caractériser pour différentes granulométries du sol, l'affouillement en fonction des paramètres inclus dans son estimation. Les différents paramètres sont estimés à partir des observations in-situ d'une base de données assez riche. Pour l'illustration des résultats, une analyse en composantes principales (ACP) ainsi qu'une analyse statique descriptive sont établies entre ces différents paramètres et les profondeurs d'affouillement observées in-situ. Les résultats obtenus montrent une grande influence des paramètres géométriques sur la profondeur d'affouillement. Une corrélation relativement modérée est observée concernant les paramètres liés à la cinétique de l'écoulement et les paramètres géotechniques.

Mots - clés : Affouillement local, Piles de pont, Vulnérabilité hydrique des ponts, Analyse descriptive.

Abstract - The local Scour around bridge piers is due to interaction between the flow, the soil, and the pier. It is defined as a highly complex phenomenon depending on many parameters, namely; physical flow parameters, geotechnical parameters, and geometric parameters. Most of the parameters are empirically chosen in the calculation formulas, whereas the real influence of these parameters on the scour is rarely mentioned. The empirical choice of parameters can lead to inaccuracies in the scour estimation. On the other hand, some parameters considered as having a low correlation with scour may unnecessarily affect the simplicity of the formulas. This study aims to characterize the scour for different soil grain sizes according to the parameters included in its estimation. The different parameters involved are estimated from in-situ observations of a rich database. To illustrate the results, a principal component analysis (PCA) as well as a descriptive static analysis are established between these different parameters and the scour depths observed in-situ. The results show a strong influence of the geometric parameters on the scour depth. A relatively moderate correlation is observed for the parameters related to others parameters

Keywords : Local scour, Bridge piers, Hydric vulnerability of bridges, Descriptive analysis.

1-Introduction

L'affouillement local est déclenché suite à l'obstruction de l'écoulement par un obstacle. Pour le cas d'un pont, les obstacles sont les piles. L'obstruction de l'écoulement provoque une érosion du sol localisé autour des piles de pont rendant ainsi le pont exposé et vulnérable.

Etant un phénomène très complexe, la compréhension de l'affouillement nécessite primordialement la compréhension de nombreux domaines scientifiques intervenant dans son mécanisme de déclenchement et d'évolution, à savoir : hydraulique, structurel et géotechnique. Le déclenchement de l'affouillement local ainsi que son évolution dans le temps et sa forme, dépendent de plusieurs paramètres estimés à partir des domaines suscités [1]. Pour les paramètres hydrauliques, l'effet des vitesses V et V_c sur l'affouillement est étudié par [2 & 3]. Pour l'impact de la structure sur l'affouillement, des études ont été menées dans ce sens par [4 - 8]. D'autres études ont été menées concernant l'effet des caractéristiques du sol sur le processus de l'affouillement [9 -13].

La plupart des études mentionnées ci-haut ont étudié l'effet de chaque paramètre sur l'affouillement d'une manière individuelle, négligeant en conséquence d'autres paramètres. Contrairement aux études déjà citées, d'autres études ont été établies incluant un nombre plus important de paramètres intervenant dans le calcul de ce phénomène [14 - 20]. Nonobstant, très peu d'études regroupant un large groupe de paramètres sont disponibles. Parmi ces dernières, certaines concernent l'affouillement uniquement pour certaines structures bien spécifiques, telles que les barrages et les structures maritimes. L'inconvénient de ces études est que les données exploitées sont estimées à partir de formules empiriques. Ces formules empiriques font souvent l'objet de discussion entre de nombreux chercheurs critiquant le choix des paramètres intervenant dans leurs équations de calcul [21- 24].

L'objectif de cet article est d'étudier l'impact de la plupart des facteurs sur l'affouillement et ce, en exploitant les observations réelles de terrain. Ces dernières sont tirées d'une base de données riche et actualisée, appelée «*The 2014 USGS Pier-*

Scour Database (PSDB-2014) » [25]. Les données figurant dans cette base de données couvrent une grande diversité de conditions de terrain et comprennent des mesures provenant de 23 États américains et de 6 autres pays. En plus des valeurs d'affouillement incluses dans la base de données, elle contient également des données relatives au pont (telles que la largeur de la pile b , la largeur normale à l'écoulement b^* , etc.) et à la rivière (telles que la profondeur d'écoulement y , la vitesse d'écoulement V , la vitesse critique V_c , etc.) à partir desquelles chaque profondeur d'affouillement a été mesurée. Dans le but de compléter l'étude, d'autres paramètres ont été calculés (tels que Fr , C_0 , et C_c) [26] et ajoutés aux paramètres déjà disponibles dans la base de données.

Huit paramètres de calcul ont été regroupés et l'influence de chacun sur l'accentuation ou l'atténuation de l'affouillement est étudiée, et cela pour différentes classes de sol, à savoir ; sol fin, sol grossier et sol très grossier. Les paramètres utilisés font parties des trois domaines dont l'affouillement est le résultat et peuvent être regroupés comme suit : l'écoulement (vitesse d'approche V , vitesse critique V_c , et nombre Froude Fr), paramètres géotechniques (type de sol suivant la taille granulométrique des sédiments D_{50} , contraintes de cisaillement du sol C et C_c) et paramètres géométriques (dimensions de la pile b et b^* , section d'approche y).

L'évaluation de l'influence de ces paramètres sur l'affouillement est établie en utilisant la statistique descriptive à l'aide de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) ainsi que les matrices de corrélation, et pour une meilleure compréhension, des graphes reliant la relation de variation « paramètre-affouillement » sont tracés pour chaque paramètre distinctement.

2-Matériels et Méthodes

Pour l'élaboration de l'étude, les observations de terrain de (PSDB-2014) sont clustérisées par classe de sol, suivant D_{50} conformément à la norme ISO 14688-1:2017 [27]. La clustérisation des données permet d'attribuer un nom de classe au sol constituant le lit du cours d'eau en fonction de sa granulométrie. Trois

classes principales sont identifiées, basées sur les fractions granulaires du sol (Tableau 1).

Tableau 1: Classes de sol par **D50** selon la norme ISO-14688-1 : 2017

Table 1: Soil classes using **D50** according to ISO-14688-1: 2017

Fractions granulaires	Observations	Taille des particules
Sol très grossier (Cailloux et Blocs)	75	$D_{50} > 63\text{mm}$
Sol grossier (Sables et Graves)	1208	$0.063 < D_{50} \leq 63\text{mm}$
Sol fin (Argile et limon)	59	$D_{50} \leq 0.063\text{mm}$

Les paramètres impactant l'affouillement sont présentés ci-dessous, regroupés selon leur nature en trois groupes (géométriques, hydrauliques et géotechniques) (1).

$$d_s = f [(b, b^*, L, y, \theta); (V, V_c, Fr); (D_{50}, C_0, C_c)] (1)$$

Avec :

- **ds** est la profondeur d'affouillement locale ;
- **b** est la largeur de la pile ;
- **b*** est la largeur de la pile normale à l'écoulement (pour piles ayant un angle d'attaque du flux) ;
- **L** est la longueur de la pile ;
- **y** est la profondeur d'écoulement ;
- **θ** est l'angle d'attaque du flux ;
- **V** est la vitesse d'écoulement ;
- **Vc** est la vitesse critique d'écoulement ;
- **Fr** est le nombre de Froude en amont de la pile ;
- **D50** est la taille médiane des sédiments ;
- **C0** est la contrainte de cisaillement du lit au niveau de la section contractée ;
- **Cc** est la contrainte de cisaillement critique du lit au début du mouvement.

Comme **θ** désigne l'angle d'attaque du flux d'approche, il est donc principalement lié à la largeur de la pile **b**. En d'autres termes, lorsque **θ** doit être pris en compte (c'est-à-dire lorsque la pile est inclinée par rapport au flux), **b*** doit remplacer **b**. Par conséquent, nous négligeons dans cette étude le paramètre **θ** dont l'effet est pris en compte dans **b***, ce dernier étant calculé comme suit [26] ;

$$b^* = b \cos \theta + L \sin \theta (2)$$

Tant que la pile est alignée avec l'écoulement, la longueur de la pile **L** n'a pas d'effet perceptible sur la profondeur d'affouillement. Lorsque la pile est inclinée par rapport à l'écoulement, **L** a une influence sur la profondeur de l'affouillement [26]. Même dans ce dernier cas, identiquement au paramètre **θ**, l'effet de **L** est déjà pris en compte dans le calcul de **b***. Ainsi, **L** pourrait être lui aussi négligé.

L'affouillement local est défini comme l'action érosive des sédiments recouvrant les piles du pont. Négliger les caractéristiques des sédiments peut conduire à des incertitudes de calcul considérables. Selon Briaud et al. [28], pour différents sols ayant des particules de tailles similaires, différents comportements d'érosion ont été observés. Néanmoins, concernant **D50**, il est rarement pris en compte dans l'établissement des formules d'affouillement où la plupart ont été estimées sur la base d'hypothèses simplificatrices concernant les sédiments du lit du cours d'eau. En effet, elles ont été estimées en laboratoire à travers des modèles prototypes réduits où les sédiments sont de petites particules uniformes [29]. En fait, il existe très peu de formules qui incluent le **D50** ou d'autres caractéristiques des sédiments. Cependant, inclure de tels paramètres en utilisant leurs valeurs mathématiques pourrait potentiellement fausser le résultat, ceci en raison de l'écart type important entre ces paramètres et les autres paramètres. Ainsi, dans cette étude, il a été décidé d'inclure l'effet de **D50** en considérant sa distribution par classes de sol, Saad et al. [30] a rapporté que la distribution de la taille des particules a un effet significatif sur la profondeur d'affouillement local.

3-Résultats et Discussions

Les Tableaux 2 à 4 présentent les matrices de corrélation obtenues par classe de sol entre la profondeur d'affouillement et les différents paramètres intervenant dans son estimation. Les résultats des matrices de corrélation et de l'ACP (Figure 1) montrent une très grande influence des paramètres géométriques (**b**, **b***, et **y**) sur l'affouillement quel que soit la classe de sol considérée.

En effet, pour toutes les classes de sol, l'amplification de la profondeur d'affouillement est principalement liée à la largeur de la pile du

pont et à la profondeur de l'écoulement. Plus ces deux dernières sont importantes et plus l'affouillement est accentué.

Pour les contraintes de sol érodé (**C0** et **Cc**), plus elles augmentent et plus l'affouillement diminue (Tableau 2), assurant ainsi la stabilité du pont vis-à-vis du phénomène d'affouillement. Il faut souligner que l'intensité de leur impact sur l'affouillement est différente d'une classe de sol à une autre. L'influence bénéfique de ces deux paramètres à réduire l'affouillement est plus présente pour la classe de sol fin que les autres deux classes (sol grossier et sol très grossier). Ce résultat peut être expliqué par le fait que les particules fines, une fois compactées, ont tendance à se comporter comme un ensemble de particules (un bloc), développant une contrainte du sol plus élevée, rendant ainsi le sol difficilement érodable. Ce résultat est moins valable pour les particules grossières, souvent dispersés sous l'écoulement et donc de plus en plus facilement érodables face à l'écoulement. Effectivement, et comme le Tableau 3 l'indique, pour la classe de sol grossier, ces deux paramètres (**C0** et **Cc**) ont une influence légère (voir négligeable) sur le résultat final de l'affouillement. Pour la classe de sol très grossier, l'accroissement de ces deux paramètres conduira à une augmentation de la profondeur d'affouillement (Tableau 4 et Figure 1c). Concernant les paramètres hydrauliques, pour des valeurs importantes du nombre de Froude **Fr**, l'affouillement a de faibles valeurs. Plus le nombre de Froude **Fr** devient important et plus l'affouillement diminue. Tandis que, pour le cas de l'écoulement fluvial (**Fr** < 1), l'affouillement constaté est plus important que celui pour des régimes d'écoulement ayant un nombre de Froude important en amont de la pile (Figure 1f). L'effet de la vitesse sur l'affouillement est également observé sur les matrices des corrélations présentées dans les Tableaux ci-dessous. La vitesse tend à augmenter la profondeur d'affouillement. L'impact de la vitesse sur l'affouillement est proportionnel à la classe de sol : plus la granulométrie est importante et plus l'impact est accentué (Figure 2 d).

Tableau 2 : Matrice de corrélation entre l'affouillement et ses paramètres pour le sol fin**Table 2:** Correlation matrix between scour and its parameters for fine soil

	ds	b	b*	y	V	Vc	Fr	C0	Cc
ds	1.0	1.0	0.8	0.7	-0.1	0.0	-0.4	-0.3	-0.4
b	1.0	1.0	0.9	0.7	-0.1	0.0	-0.4	-0.3	-0.4
b*	0.8	0.9	1.0	0.6	-0.3	-0.1	-0.5	-0.4	-0.5
y	0.7	0.7	0.6	1.0	0.1	0.0	-0.5	-0.3	-0.5
V	-0.1	-0.1	-0.3	0.1	1.0	0.0	0.7	0.7	0.1
Vc	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	1.0	-0.1	0.1	0.8
Fr	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	0.7	-0.1	1.0	0.9	0.4
C0	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	0.7	0.1	0.9	1.0	0.5
Cc	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	0.1	0.8	0.4	0.5	1.0

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre l'affouillement et ses paramètres pour le sol grossier**Table 3 :** Correlation matrix between scour and its parameters for coarse soil

	ds	b	b*	y	V	Vc	Fr	C0	Cc
ds	1.0	0.6	0.3	0.6	0.3	-0.1	0.0	-0.1	-0.2
b	0.6	1.0	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.0
b*	0.3	0.4	1.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1
y	0.6	0.4	0.2	1.0	0.3	-0.1	-0.3	-0.1	-0.2
V	0.3	0.4	0.1	0.3	1.0	0.5	0.7	0.7	0.4
Vc	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.5	1.0	0.5	0.7	0.9
Fr	0.0	0.1	0.0	-0.3	0.7	0.5	1.0	0.8	0.5
C0	-0.1	0.1	0.0	-0.1	0.7	0.7	0.8	1.0	0.7
Cc	-0.2	0.0	0.1	-0.2	0.4	0.9	0.5	0.7	1.0

Tableau 4 : Matrice de corrélation entre l'affouillement et ses paramètres pour le sol très grossier**Table 4 :** Correlation matrix between scour and its parameters for very coarse soil

	ds	b	b*	y	V	Vc	Fr	C0	Cc
ds	1.0	0.7	0.5	0.7	0.4	0.8	-0.2	0.4	0.7
b	0.7	1.0	0.8	0.5	0.4	0.7	-0.2	0.5	0.6
b*	0.5	0.8	1.0	0.4	0.4	0.6	-0.2	0.4	0.4
y	0.7	0.5	0.4	1.0	0.5	0.8	-0.4	0.3	0.2
V	0.4	0.4	0.4	0.5	1.0	0.5	0.4	0.9	0.2
Vc	0.8	0.7	0.6	0.8	0.5	1.0	-0.3	0.4	0.7
Fr	-0.2	-0.2	-0.2	-0.4	0.4	-0.3	1.0	0.6	-0.1
C0	0.4	0.5	0.4	0.3	0.9	0.4	0.6	1.0	0.4
Cc	0.7	0.6	0.4	0.2	0.2	0.7	-0.1	0.4	1.0

Les matrices de corrélation ci-haut présentées confirment l'hypothèse que le comportement de l'affouillement est différent suivant la classe de sol étudié. Les paramètres les plus prépondérants pour une classe de sol donnée, ne sont pas forcément ceux qui impacteront le résultat de l'affouillement pour une autre classe.

La Figure 1 représente l'ACP établie entre l'affouillement et les différents paramètres intervenant dans son calcul. Cette analyse confirme la variabilité de dépendance de l'affouillement par rapport à chacun des paramètres impactant son résultat. Pour les classes de sol fin et grossier, l'accroissement de l'affouillement est exclusivement lié aux paramètres géométriques. Pour la classe de sol grossier, s'ajoutent aux paramètres prépondérants suscités, les paramètres liés au comportement solide de la particule érodée (paramètres géotechniques).

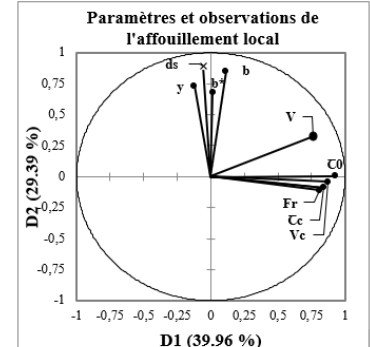
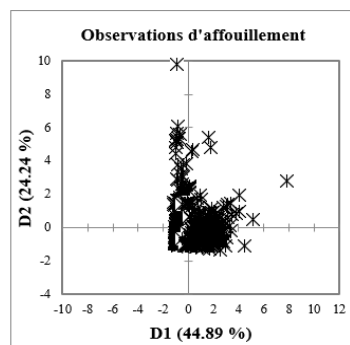
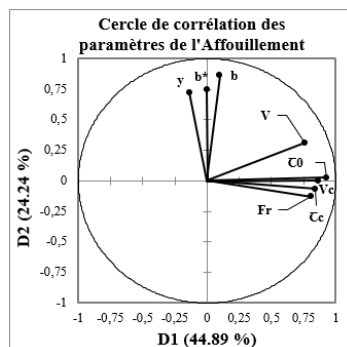
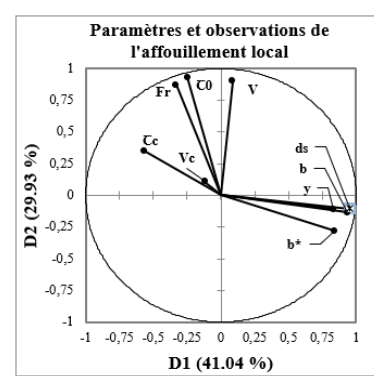
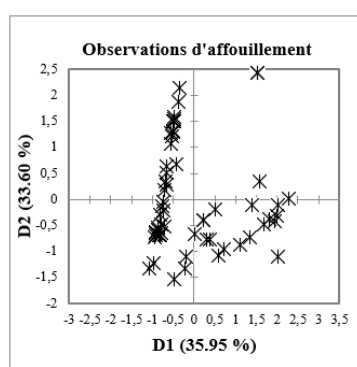
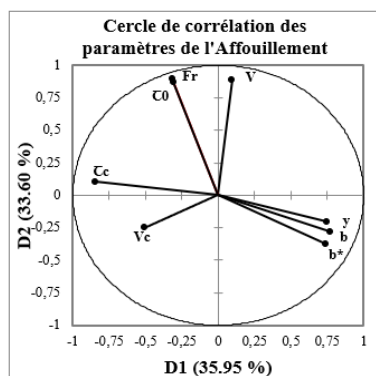
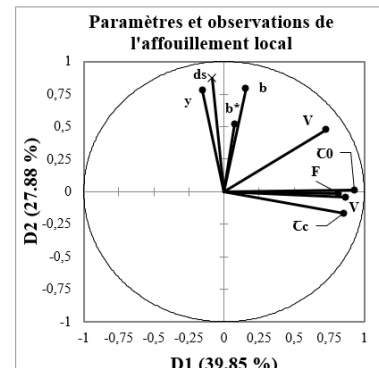
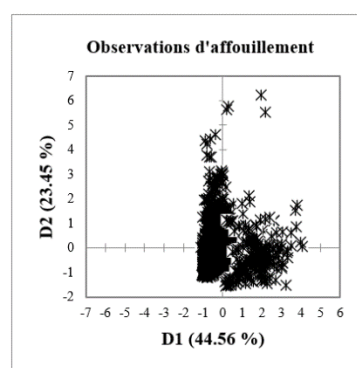
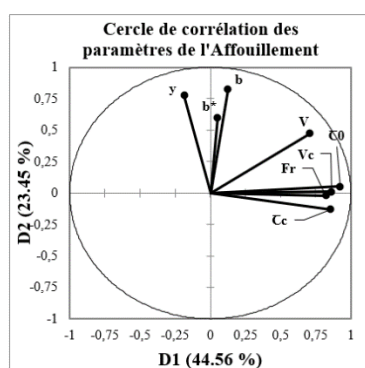
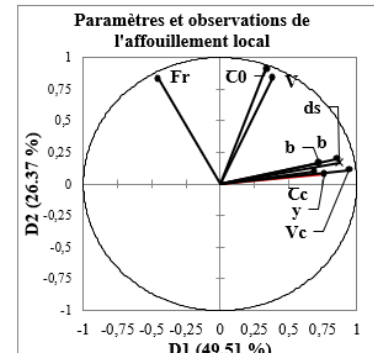
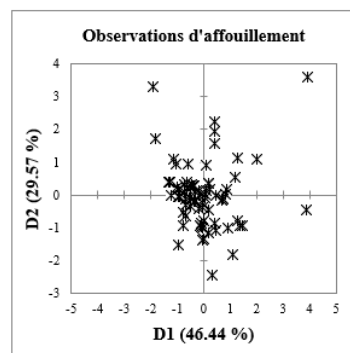
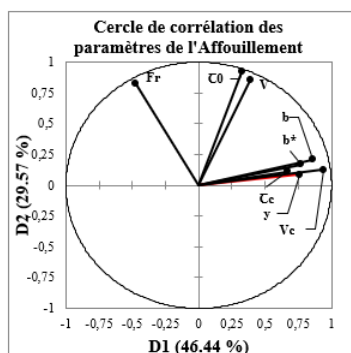
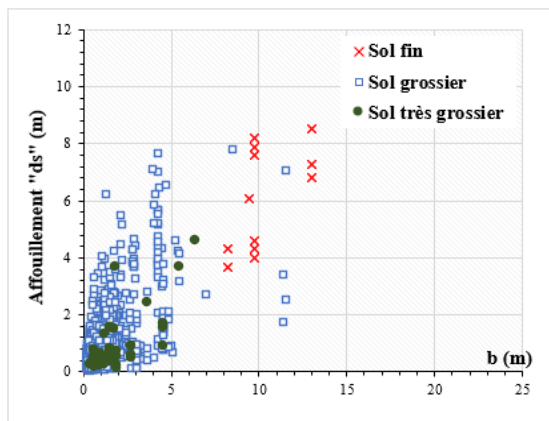
(a) Ensemble des données
All data(b) Sol fin
Fine soil(c) Sol grossier
Coarse soil(d) Sol très grossier
Very coarse soil

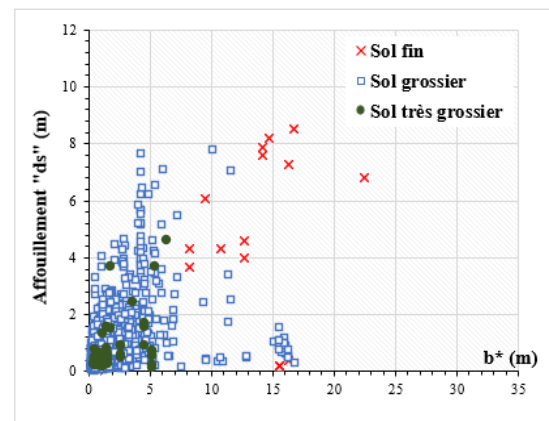
Figure1 : Résultats ACP par classe de sol, entre l'affouillement local et ses paramètres
Figure 1: PCA results by soil class, between the local scour and its parameters

A partir des résultats de l'ACP, il est clairement perceptible que les paramètres géométriques, à savoir (b , b^* , et y) sont les plus prépondérants dans l'estimation de l'affouillement. Intervenir sur ces paramètres permet de contrôler l'intensité de l'affouillement et réduire ainsi son impact vulnérable sur le pont. A partir de l'ACP, il semblerait évident que la généralisation d'une seule formule pour le calcul de l'affouillement incluant les mêmes paramètres pour tous les types de sol est explicitement parmi les causes de défaillance des formules. En effet, le déclenchement de l'affouillement ainsi que son évolution, sont différents d'un type de sol à un autre.

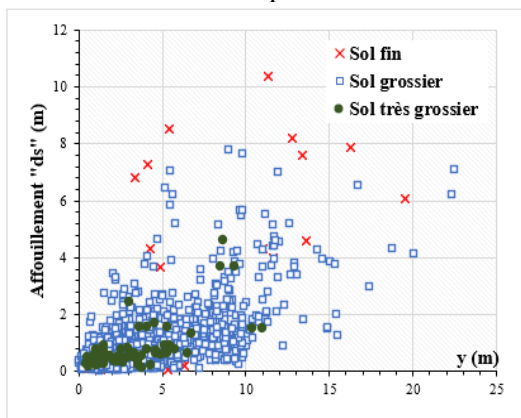
Pour une meilleure illustration de l'impact de chaque paramètre, des graphes sont tracés pour chaque paramètre, permettant ainsi de mettre en évidence la relation de variation paramètre-affouillement (Figure 2).



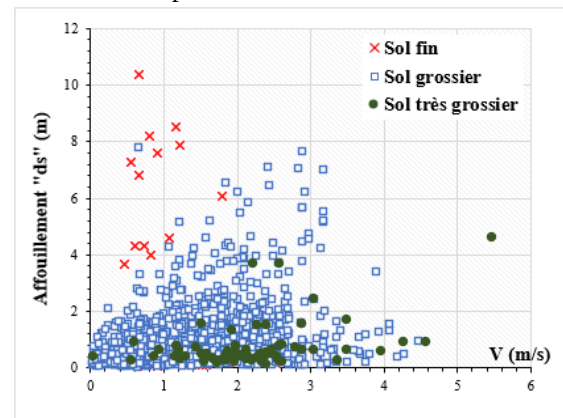
(a) La largeur de la pile ' b '
The pierwidth ' b '



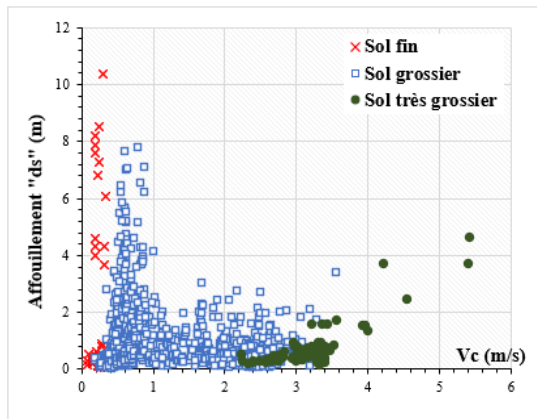
(b) La largeur de la pile normale à l'écoulement ' b^* '
The pier width normal to the flow ' b^* '



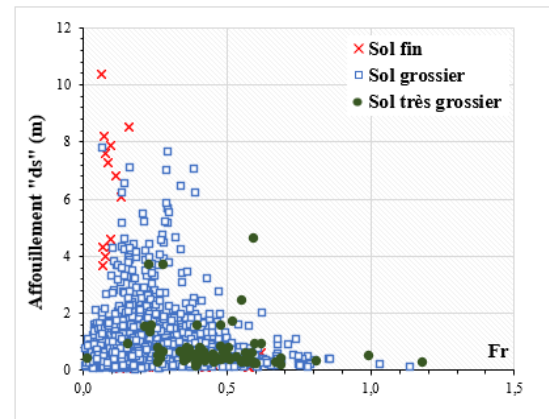
(c) Profondeur d'écoulement ' y '
The flow depth ' y '



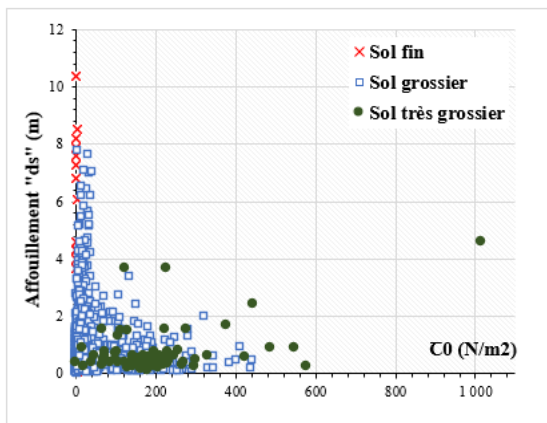
(d) Vitesse d'écoulement ' V '
The flow velocity ' V '



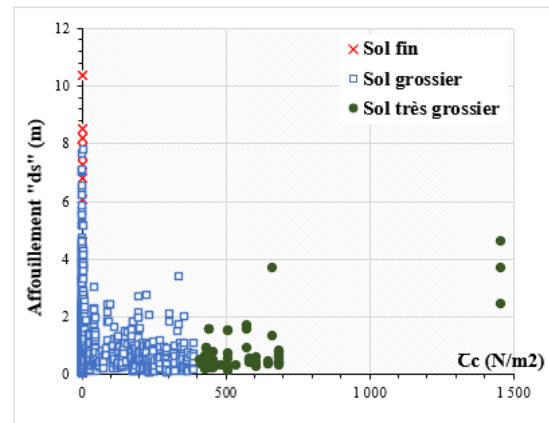
(e) Vitesse critique d'écoulement 'Vc'
The critical velocity 'Vc'



(f) Nombre de Froude en amont de la pile 'Fr'
Froude number upstream of the pier 'Fr'



(g) La contrainte de cisaillement du lit 'C0'
The bed shear stress 'C0'



(h) La contrainte de cisaillement critique 'Cc'
The critical bed shear stress 'Cc'

Figure 2 : Variation de la profondeur d'affouillement en fonction de la variation de ses paramètres

Figure 2 : Variation of the scour depth as a function of the variation of its parameters

La Figure 2 présente la relation paramètre-affouillement pour les différentes classes de sol considérées dans cette étude. Pour tous les paramètres confondus, les profondeurs d'affouillement les plus importantes, sont observées pour la classe de sol fin. Plus la granulométrie du sol augmente et plus l'affouillement est maximal.

L'accroissement des paramètres (**b**, **b***, **y**, et **V**) impliquera l'accroissement de la profondeur d'affouillement. L'accroissement des paramètres (**Vc**, **Fr**, **C0**, et **Cc**) impliquera la décroissance de la profondeur d'affouillement.

4- Conclusion

L'affouillement local autour des piles de pont est un phénomène complexe dépendant de plusieurs facteurs et paramètres influençant son résultat. L'affouillement est exprimé en termes de hauteur (profondeur). Cette dernière est le produit d'interaction de ces divers paramètres. En effet, la profondeur de l'affouillement est estimée à l'aide de formules incluant des paramètres choisis empiriquement dans les équations de calcul. Le choix aléatoire de paramètres de calcul peut provoquer des imprécisions lors de l'estimation de l'affouillement, engendrant soit une sous-estimation du phénomène soit une surestimation, induisant des coûts supplémentaires inutiles.

L'objectif de cette étude est de caractériser la dépendance de l'affouillement en fonction des paramètres inclus dans son estimation et ce, pour différentes classes de sol. Les différents paramètres pris dans cette étude sont tirés et estimés à partir d'observations réelles du terrain d'une riche base de données. Trois groupes de paramètres ont été retenus dans cette étude, à savoir ; paramètres géométriques, paramètres hydrauliques et paramètres géotechniques.

Une analyse en composantes principales (ACP) ainsi qu'une analyse statique descriptive sont établies entre ces différents paramètres et les profondeurs d'affouillement observées in-situ. L'analyse effectuée montre une grande influence des paramètres géométriques (b , b^* , et y) sur la profondeur d'affouillement, cette influence est décrite comme étant une relation de corrélation directe pour toutes les classes de sol considérées dans cette étude. Une corrélation négative, relativement modérée est observée concernant les paramètres liés à la cinétique de l'écoulement (V , V_c , et Fr) et les paramètres géotechniques (C_0 et C_c) pour la classe de sol à granulométrie faible. Pour les classes de sol à granulométrie élevée, l'impact de ces deux groupes de paramètres s'inverse indiquant une augmentation de l'affouillement.

Références bibliographiques

- [1] E. Akhlaghi, M. S., Babarsad, E. Derikvand, et M. Abedini, « Assessment the effects of different parameters to rate scour around single piers and pile groups: a review », *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, n° 1, p. 183-197, 2020.
- [2] H. J. Zhao, D. X. Li, et X. K. Wang, « Study on Flow Velocity Field of Local Scour around the Pier Protected by the Sediment Storage Dam », *Advanced Materials Research*, 2012. <https://www.scientific.net/AMR.594-597.1975> (consulté le janv. 25, 2021).
- [3] M. Ö. Yeleğen et A. Uyumaz, « Flow Velocity Effect on Clear Water Bridge Pier Scour », mars 2016. doi: 10.11159/icesdp16.103.
- [4] C. Fael, R. Lança, et A. Cardoso, « Pier shape and alignment effects on local scour », in *SHF Conference: Small scale morphological evolution of costal, estuarine and river systems*, 2014, p. 1-4.
- [5] C. Roy, « Effect of Bridge Pier Geometry on Local Scouring », *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 10, n° 02, p. 374-77, 2017.
- [6] Y. A. Moussa et M. Atta, « Effect of Pile Arrangement on Local Scour Depth », in *Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia*, 2017, p. 338-347.



- [7] Z. Bozkuş, M. C. Özalp, et A. E. Dinçer, « Effect of Pier Inclination Angle on Local Scour Depth Around Bridge Pier Groups », *Arab J Sci Eng*, vol. 43, n° 10, p. 5413-5421, oct. 2018, doi: 10.1007/s13369-018-3141-2.
- [8] L. Wang, B. W. Melville, A. Y. Shamseldin, et R. Nie, « Impacts of Bridge Piers on Scour at Downstream River Training Structures: Submerged Weir as an Example », *Water Resources Research*, vol. 56, n° 4, p. e2019WR026720, 2020, doi: <https://doi.org/10.1029/2019WR026720>.
- [9] B. Przedwojski, « Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes », *Journal of Hydraulic Research*, vol. 33, n° 2, p. 257-273, mars 1995, doi: 10.1080/00221689509498674.
- [10] A. Molinas, S. Jones, et M. Hosny, « Effects of cohesive material properties on local scour around piers », *Transportation research record*, vol. 1690, n° 1, p. 164-174, 1999.
- [11] A. K. Barbhuiya et M. H. Mazumder, « Live-bed local scour around vertical-wall abutments », *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 20, n° 3, p. 339-351, 2014.
- [12] B. H. Mir, M. A. Lone, J. A. Bhat, et N. A. Rather, « Effect of Gradation of Bed Material on Local Scour Depth », *Geotech GeolEng*, vol. 36, n° 4, p. 2505-2516, août 2018, doi: 10.1007/s10706-018-0479-x.
- [13] G. Elsaeed, A. M. Ali, A. N. El-Hazek, et A. M. Ibraheem, « Impact of Bed Material on the Local Scour Downstream Fayoum Type Weir with Various Designs of Floor Jets », *Asian Journal of Engineering and Technology (ISSN: 2321-2462)*, vol. 8, n° 01, 2020.
- [14] B. W. Melville, « The physics of local scour at bridge piers », in *Proceedings 4th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-4). November 5-7, 2008, Tokyo, Japan, 2008*, p. 28-40.
- [15] M. Muzzammil et N. A. Siddiqui, « A reliability-based assessment of bridge pier scour in non-uniform sediments », *Journal of hydraulic research*, vol. 47, n° 3, p. 372-380, 2009.
- [16] S. Kim, H.-J. Lee, et J.-H. Yeon, « Characteristics of parameters for local scour depth around submarine pipelines in waves », *Marine Georesources and Geotechnology*, vol. 29, n° 2, p. 162-176, 2011.
- [17] A. Yeganeh-Bakhtiary, M. A. Ghorbani, et A. Pourzangbar, « Determination of the most important parameters on scour at coastal structures », *J. Civil Eng. Urbanism*, vol. 2, n° 2, p. 68-72, 2012.
- [18] M. Qi, J. Li, et Q. Chen, « Comparison of existing equations for local scour at bridge piers: parameter influence and validation », *Natural Hazards*, vol. 82, juill. 2016, doi: 10.1007/s11069-016-2287-z.



- [19] I. Ebtehaj, H. Bonakdari, A. H. Zaji, et H. Sharafi, « Sensitivity analysis of parameters affecting scour depth around bridge piers based on the non-tuned, rapid extreme learning machine method », *Neural Computing and Applications*, vol. 31, n° 12, p. 9145-9156, 2019.
- [20] E. Akhlaghi, M. S. Babarsad, E. Derikvand, et M. Abedini, « Assessment the effects of different parameters to rate scour around single piers and pile groups: a review », *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, n° 1, p. 183-197, 2020.
- [21] T. Mohamed, M. J. M. M. Noor, A. H. Ghazali, et B. Huat, « Validation of some bridge pier scour formulae using field and laboratory data », 2005, doi: 10.3844/AJESSP.2005.119.125.
- [22] A. Thameret *et al.*, « Validation of Some Bridge Pier Scour Formulae and Models Using Field Data », *Eng. Sci.*, vol. 19, p. 31-41, janv. 2006, doi: 10.1016/S1018-3639(18)30846-8.
- [23] Y. Abdelmonem, Y. E. Mostafa, et D. M. Atta, « Validation of Bridge Pier and Abutment Scour Equations », in *Symposium on Coastal & Port Engineering*, 2009, vol. 28, p. 30.
- [24] M. Kiraga, J. Urbański, et S. Bajkowski, « Adaptation of Selected Formulas for Local Scour Maximum Depth at Bridge Piers Region in Laboratory Conditions », *Water*, vol. 12, n° 10, p. 2663, 2020.
- [25] S. T. Benedict et A. W. Caldwell, « A pier-scour database: 2,427 field and laboratory measurements of pier scour », *US Geological Survey Data Series*, vol. 845, 2014.
- [26] L. A. Arneson, L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse, et P. E. Clopper, « Evaluating scour at bridges », National Highway Institute (US), 2012.
- [27] E. Iso, « 14688-1: 2017: Geotechnical investigation and testing—Identification and classification of soil—Part 1: Identification and description », *International Organization for Standardization*, Geneva, 2017.
- [28] J.-L. Briaud, F. C. Ting, H. C. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu, et G. Wei, « SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 125, n° 4, p. 237-246, 1999.
- [29] T. A. Mohamed, S. Pillai, M. J. M. M. Noor, A. H. Ghazali, B. K. Huat, et B. Yusuf, « Validation of some bridge pier scour formulae and models using field data », *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 19, n° 1, p. 31-40, 2006.
- [30] N. Y. Saad, E. M. Fattouh, et M. Mokhtar, « Effect of L-shaped slots on scour around a bridge abutment », *Water Practice and Technology*, 2021.