

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire De Fin D'études

En Vue De L'obtention Du Diplôme D'ingénieur Et Du Master En
Sciences De La Mer

Option : Ingénierie De La Génie Côtier et De L'Aménagement de Littoral

Thème :

Analyse de comportement des pieux latéralement chargés et modélisation assistée par intelligence artificielle

Présenté par :

Bouguelmouna Mouna Aoumria

Troum Jaouhar

Soutenue publiquement, le 21 /06 /2026 devant le jury composé de:

L. AMROUCHE Maitre de conférences classe "A" à l'École Nationale Supérieure **Présidente**
Des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.

A.BELMOKRE Phd en hydraulique **Examineur**

A. LAOUEDJ Maitre de conférences classe "B" à l'École Nationale Supérieure **Encadrant**
Des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral

Année universitaire: 2026/2027

Remerciement

Alhamdulillah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce mémoire de fin d'études.

Ce mémoire marque la fin d'un chapitre, mais il représente aussi le fruit de plusieurs mois de travail, d'efforts, de doutes parfois, et de belles surprises. Nous tenons donc à remercier du fond du cœur tous ceux qui, à leur manière, ont rendu cette aventure possible.

Un immense merci à notre encadreur, Mr. Laoudj Abdesselem, pour son accompagnement bienveillant, sa patience, ses conseils avisés, et surtout pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce projet. Ses remarques pertinentes et son soutien nous ont énormément aidés à avancer et à clarifier nos idées.

Nous remercions également les membres du jury qui ont acceptés d'évaluer ce modeste travail.

Enfin, un merci tout particulier à nos familles, qui ont été nos piliers tout au long de ce parcours. Merci pour votre soutien indéfectible, vos encouragements constants et votre capacité à nous redonner le sourire. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.

Dédicace de Mouna

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude à tous ceux qui se sont sacrifiés pour m'offrir les conditions propices à ma réussite.

À ma chère maman Faiza, Ma reine, ma guerrière silencieuse. Celle qui priait en cachette pendant que je pleurais mes échecs. Celle qui m'a portée dans ses bras quand je n'avais plus la force de me porter moi-même. Si aujourd'hui je suis debout, c'est parce que tu as tenu le monde pour deux.

À mon cher papa Ben Friha, L'homme de peu de mots mais de grands gestes. Tes sacrifices n'ont jamais eu besoin de discours, ils parlaient d'eux-mêmes. Tu m'as appris la dignité dans l'effort, et la fierté dans le silence. Merci d'avoir cru en moi sans le dire, mais en le prouvant.

À mes chers frères Aymen et Boubaker et ma chère sœur Ahlem, Vous avez toujours été une source de force, de soutien et de réconfort dans ma vie. Dans les moments de doute comme dans les instants de joie, votre présence a été précieuse. Merci pour vos encouragements, votre affection sincère et tous les souvenirs partagés qui ont illuminé mon parcours.

Votre amour et votre confiance m'ont aidée à avancer avec courage et détermination. Que ce travail soit aussi le reflet des liens forts qui nous unissent. Je vous porte dans mon cœur avec toute ma gratitude et mon affection.

À moi-même, Tu as été au bord du découragement, tu as connu l'échec, la fatigue, l'injustice, les "t'es sûre que c'est fait pour toi ?"

Mais t'as pas lâché. T'as recommencé. T'as recommencé encore.

Tu t'es choisie. Et aujourd'hui, tu y es.

Ce diplôme, c'est ton trophée de guerre.

À ma vraie amie Jaouhar, La vraie amie, mon binôme. Celle qui a tenu ma main dans l'ombre, qui m'a laissée pleurer sans jugement, qui a ramené des fous rires dans mes tempêtes mentales. Tu as été ma famille choisie, mon lampadaire dans les nuits noires.

Ce mémoire, ce n'est pas juste un projet.

C'est une revanche. Une réponse aux doutes, aux refus, aux abandons.

Dédicace de Jaouhar

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts avec une profonde gratitude et une grande fierté.

À moi-même, Je me dédie ce parcours pour ma persévérance, ma volonté, ma patience et ma confiance en mes capacités. À moi qui ai choisi de continuer malgré les difficultés, la fatigue et les obstacles rencontrés sur le chemin. À moi qui ai appris à tomber puis à me relever avec plus de force et de motivation. Chaque étape franchie, chaque défi surmonté et chaque nuit de travail ont contribué à construire la personne que je suis aujourd'hui.

À ma très chère mère, À celle qui est mon pilier, mon refuge et ma force. Tes prières sincères et silencieuses, ton soutien inconditionnel et ton amour infini m'ont accompagnée à chaque étape de ce long parcours. Tu as été là dans mes moments de doute comme dans mes moments de joie. Que Dieu te préserve et t'accorde santé, bonheur et longue vie.

À mon cher père, À celui dont la fatigue quotidienne, le courage silencieux et la détermination sans faille sont pour moi une source d'inspiration inépuisable. Tu t'es sacrifié sans jamais te plaindre, pour que je puisse atteindre mes rêves. Que Dieu te récompense, te donne santé, force et longue vie.

À mon frère Okba, À mon frère, mon confident et mon soutien. Pour ta confiance en moi, tes encouragements constants et ta présence bienveillante qui m'ont toujours poussée à me dépasser et à aller de l'avant. Tu as cru en moi même dans les moments où je doutais de moi-même. Que Dieu te préserve.

À ma grande mère, Que dieu la protège.

À mes chères sœurs : Hanane, pour ta tendresse infinie, ton soutien sans faille et pour avoir si souvent endossé le rôle de mère avec douceur et dévouement. **Amira,** pour ton amour sincère et ta bienveillance naturelle qui réchauffent le cœur. **Abla,** pour tes précieux conseils, ta sagesse et ton soutien constant. Tu m'as guidée avec bienveillance tout au long de ce chemin. **Djoumana,** la petite dernière, celle qui remplit chaque instant de joie et de lumière. Tu es le sourire de notre famille.

À la femme de mon frère, Amel, Pour ta gentillesse naturelle, ta générosité de cœur et ton soutien sincère.

À mes amies et sœurs de cœur, Mouna et Wissal, À celles que la vie m'a offertes comme un cadeau précieux. Pour votre amitié sincère et indéfectible, vos rires partagés et tous ces souvenirs inoubliables que nous avons construits ensemble. Vous êtes bien plus que des amies, vous êtes mes sœurs d'âme.

Que ce travail soit le témoignage de tout le chemin parcouru et le début d'un avenir rempli de réussite, de bonheur et d'accomplissements.

Table des matière

Introduction générale	II
------------------------------------	-----------

Chapitre I

Étude bibliographique du comportement des pieux isolés sous chargement latéral	1
---	----------

I.1	Introduction.....	2
I.2	Définition des fondations.....	2
I.3	Définition d'un pieu.....	2
I.4	Le rôle des pieux.....	3
I.5	Classification des pieux	3
I.5.1	Classification des pieux selon le mode d'installation	4
I.5.2	Classification selon les matériaux constitutifs	5
I.6	Les méthodes de détermination de la charge latérale ultime Hu	6
I.6.1	Méthode de Broms 1964.....	6
I.6.2	Méthode de Brinch Hansen (1961).....	9
I.6.3	Méthode de Meyerhof (1995).....	10
I.7	Les méthodes de détermination de la raideur initiale Ki	11
I.7.1	Méthode de Reese et Matlok (1961).....	11
I.7.2	Méthode Poulos et Davis (1980) :	12
I.8	Les essais en modèles réduits à 1g en laboratoire.....	13
I.9	Conclusion	14

Chapitre II

Présentation de la base de données d'essais de chargement des pieux	15
--	-----------

II.1	Introduction.....	16
II.2	Description des pieux.....	16
II.2.1	Géométrie des pieux	16
II.2.2	Analyse statistique des paramètres géométriques.....	21
II.2.3	Propriétés du sol des pieux	24
II.2.4	Analyse statistique des propriétés du sol des pieux	29
II.2.5	Propriétés de la charge et instrumentation	32

II.3	Analyse statistique	35
II.4	Conclusion	37

Chapitre III

Comportement des pieux soumis aux charges latérales et classification selon la rigidité

39

III.1	Introduction.....	40
III.2	Méthode de Poulos et Hull (1992).....	40
III.3	Conclusion	46

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

47

IV.1	Introduction.....	48
IV.2	Le modèle de régression linéaire	48
IV.3	Le modèle de régression linéaire multiple	48
IV.4	Analyse statistique	53
IV.5	Évaluation de la formule proposée en régression multiple pour la prédiction de la charge latérale ultime H_u , de la raideur initiale K_i et de la charge $H(10\%B)$	56
IV.6	Le modèle de régression puissance.....	57
IV.7	Analyse statistique	61
IV.8	Confrontation entre les valeurs expérimentales et les prédictions théoriques basée sur la régression en loi puissance.....	66
IV.9	Validation de la supériorité du modèle de régression en loi puissance sur la régression linéaire multiple	71
IV.10	Conclusion	72

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques.....

73

V.1	Introduction.....	74
V.2	Synthèse comparative des résultats expérimentaux et analytiques des paramètres H_u et $H(10\%B)$	74
V.3	Analyse statistique de la charge latérale ultime H_u	79
V.4	Synthèse comparative des résultats expérimentaux et analytiques des paramètres K_i	82
V.5	Analyse statistique de la raideur initiale K_i	86

V.6	Évaluation des méthodes de prédiction de la charge latérale ultime <i>Hu</i> et de la raideur initiale <i>Ki</i>	88
V.6.1	Évaluation des méthodes de prédiction de la charge latérale ultime <i>Hu</i>	88
V.6.2	Évaluation des méthodes de prédiction de la raideur initiale <i>Ki</i>	90
V.7	Conclusion	91
	Conclusion générale	93
	Annexes	95
	Références bibliographiques	102
	Résumé	105
	Abstract	105

Listes des figures

Figure 1: Définition d'un pieu (<i>Zamoum, 2015</i>)	3
Figure 2: Schéma de vibro-fonçage d'un pieu métallique (<i>Bouafia, 2026</i>)	5
Figure 3: Exemple de pieux vissés métalliques (<i>Bouafia, 2026</i>)	5
Figure 4: Les différents matériaux constitutifs (<i>Boumaza Nour El Houda, 2015</i>)	6
Figure 5: Pieu rigide dans un milieu pulvérulent (<i>Broms, 1964</i>)	7
Figure 6: Pieu flexible dans un milieu pulvérulent (<i>Broms, 1964</i>)	7
Figure 7: Résistance latérale ultime de pieu rigide et de pieu souple dans un sol pulvérulent (<i>Broms, 1964</i>)	8
Figure 8: Les coefficients de la résistance latérale (<i>Hansen, 1961</i>)	10
Figure 9: Conteneur d'essai sur modèles de pieux (<i>Bouafia et al., 1996</i>)	13
Figure 10: Distribution statistique de la longueur d'ancrage D	22
Figure 11: Distribution statistique du diamètre B	22
Figure 12: Distribution statistique du rapport D/B	22
Figure 13: Distribution statistique de l'excentricité e	22
Figure 14: Distribution statistique de la rigidité en flexion EI	22
Figure 15: Répartition des pieux selon le matériau	24
Figure 16: Statistique descriptive du poids volumique γ	30
Figure 17: Statistique descriptive de l'angle de frottement interne φ	30
Figure 18: Statistique descriptive de la densité relative Dr	30
Figure 19: Répartition des sols selon leur densité	31
Figure 20: Courbe charge latérale – déplacement horizontal du pieu 6L90 (<i>Vidic et al., 1992</i>)	35
Figure 21: Distribution statistique des paramètres mesurés H_u et K_i selon le type de comportement des pieux : Flexible, Intermédiaire et Rigide	36
Figure 22: Analyse statistique de la classification des pieux selon leur rigidité	46
Figure 23: Distribution statistique des paramètres calculés $H_u, K_i, H(10\%B)$ selon le type de comportement des pieux : Flexible, Intermédiaire et Rigide	63
Figure 24: Distribution statistique des paramètres calculés $H_u, K_i, H(10\%B)$ selon le type de comportement des pieux : Flexible, Intermédiaire et Rigide	63
Figure 25: dispersion des valeurs de H_u (N) calculées en fonction des valeurs mesurées....	66
Figure 26: dispersion des valeurs de K_i (N/mm) calculées en fonction des valeurs mesurées.	68

Figure 27: dispersion des valeurs de $H(10\%B)(N)$ calculées en fonction des valeurs mesurées	69
Figure 28: Statistique descriptive de la charge latérale ultime H_u selon Broms (Cas Flexible)	80
Figure 29: Statistique descriptive de la charge latérale ultime H_u selon Broms (Cas Intermédiaire)	80
Figure 30: Statistique descriptive de la charge latérale ultime H_u selon Brinch Hansen (Cas Rigide)	80
Figure 31: Statistique descriptive de la charge latérale ultime H_u selon Broms (Cas Rigide)	80
Figure 32: Statistique descriptive de la charge latérale ultime H_u selon Meyerhof (Cas Rigide)	81
Figure 33: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Reese& Matlock (Cas Flexible)	87
Figure 34: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Reese& Matlock (Cas Intermédiaire)	87
Figure 35: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Poulos& Davis (Cas Flexible)	87
Figure 36: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Poulos& Davis (Cas Intermédiaire)	87
Figure 37: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Poulos& Davis (Cas Rigide)	87

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des pieux (Adapté du Manuel canadien d'ingénierie des fondations (MCIF) 2006) (<i>Abdelkarim, 2022</i>)	4
Tableau 2: Les équations pour le calcul de H_{ult} dans un sol pulvérulent (<i>Broms, 1964</i>)	8
Tableau 3: Les paramètres géométriques des pieux	17
Tableau 4: Statistiques descriptives des paramètres géométriques des pieux	21
Tableau 5: Les propriétés du sol des pieux.....	25
Tableau 6: Statistiques descriptives des propriétés géotechniques du sol des pieux.....	29
Tableau 7: Les propriétés de la charge et instrumentation	32
Tableau 8: Analyse statistique des valeurs mesurées des paramètres latéraux des pieux : H_u et K_i	35
Tableau 9: Récapitulatif des données de la littérature et des références bibliographiques des pieux étudiés	38
Tableau 10: Formules des facteurs d'influence selon la méthode de Poulos (sol Gibson $\nu=0.50$) (<i>BOUAFIA, 2018</i>)	41
Tableau 11: Détermination du comportement des pieux selon Poulos et Hull (1992).....	42
Tableau 12: Coefficients de régression des modèles prédictifs de H_u selon la rigidité des pieux	50
Tableau 13: Coefficients de régression des modèles prédictifs de K_i selon la rigidité des pieux	51
Tableau 14: Coefficients de régression des modèles prédictifs de $H(10\%B)$ selon la rigidité des pieux	52
Tableau 15: Analyse statistique des valeurs calculées paramètres latéraux des pieux : H_u , K_i et $H(10\%B)$	53
Tableau 16: Synthèse des coefficients de détermination R^2 de H_u , K_i et $H(10\%B)$	56
Tableau 17: Coefficients de régression des modèles prédictifs de H_u selon la rigidité des pieux	59
Tableau 18: Coefficients de régression des modèles prédictifs de K_i selon la rigidité des pieux	60
Tableau 19: Coefficients de régression des modèles prédictifs de $H(10\%B)$ selon la rigidité des pieux	60

Tableau 20: Analyse statistique des valeurs calculées paramètres latéraux des pieux : H_u , K_i et $H(10\%B)$	62
Tableau 21: Synthèse des coefficients de détermination R^2 de H_u , K_i et $H(10\%B)$	71
Tableau 22: Comparaison des résultats des paramètres, H_u et $H(10\%B)$ obtenues par différentes méthodes analytiques.....	75
Tableau 23: Comparaison statistique de la charge latérale ultime H_u selon les méthodes de Broms, Meyerhof et Brinch Hansen selon la rigidité des pieux.	79
Tableau 24: Comparaison des résultats de la raideur initiale K_i obtenues par différentes méthodes analytiques.....	82
Tableau 25: Comparaison statistique de la raideur initiale K_i selon les méthodes de Reese & Matlock, Poulos & Davis selon la rigidité des pieux.....	86
Tableau 26: Synthèse des coefficients de détermination R^2 de la charge latérale ultime H_u des méthodes étudiées.....	89
Tableau 27: Synthèse des coefficients de détermination R^2 de la raideur initiale K_i des méthodes étudiées	90

Liste des Symboles

Symbol	Signification	Unité
Minuscules latines		
e	Excentricité	m
f	profondeur du point où se développe le moment maximal dans le pieu	m
f_y	La limite d'élasticité de l'acier	MPa
k	Le module de la réaction initial du sol	kN/m^3
k_c	Le coefficient de réaction initial avec composants de la cohésion	kN/m^3
m	Taux d'augmentation linéaire avec la profondeur	kPa
p_l^*	La pression limite nette	kPa
p_{le}^*	La pression limite équivalente nette	kPa
P_{max}	La pression de terre maximale	kPa
y_0	Le déplacement latéral en surface du pieu	m
y'	La rotation latérale en surface du pieu	m
z	La profondeur du pieu de la surface du sol	m
Majuscules latines		
B	Diamètre du pieu	m
D	Longueur d'ancrage du pieu dans le sol	m
D_c	La profondeur critique du chargement latérale	m
D_e	La longueur effective	m
D_{eu}	Profondeur efficace du pieu équivalent rigide	m

D_r	La densité relative	%
E	Le module d'élasticité	MPa
E_p	Le module de Young de pieu	MPa
H_0	Effort horizontal appliqué en tête du pieu	KN
H_{ult}	La pression ultime aux déplacements (la capacité portante horizontale ultime)	KN
$H(Y)$	La charge au 10% de diamètre B du pieu	KN
I_p	Moment d'inertie de la section transversale du pieu	m^4
I_{YH} et I_{YM}	Les facteurs d'influence selon la méthode de Poulos	/
K_0	Le coefficient de pression des terres au repos	$N.m^{-2}$
K_i	La raideur initiale	$N.m^{-2}$
K_p	Le coefficient de pression des terres	$N.m^{-1}$
k_s	Module de réaction latéral dans un sable	$N.m^{-3}$
K_{br}	Coefficient résultant de pression latérale du sol sur le fût du pieu	/
K_R	La rigidité relative sol-pieu pour un sol constant avec la profondeur	/
K'_R	La rigidité relative sol-pieu pour un sol varie linéairement avec la profondeur	/
L	La longueur du pieu	m
M	Moment de flexion du pieu	$kN.m$
M^*	La fonction d'ajustement du moment de flexion du pieu par des jauges	$kN.m$
M_0	Moment de flexion appliqué en tête du pieu	$kN.m$
M_{max}	Le moment fléchissant maximum	$kN.m$
M_{ult}	Le moment de flexion limite (ultime)	$kN.m$

M_y	Le moment pour un pieu charge latérale et fixe en tête	$kN.m$
N_h	Un coefficient de réaction dépendant de la densité du sable	/
N_q	Facteur de capacité portante	/
Q_n	Charge latérale ultime	KN
T	La longueur de transfert (ou facteur de flexibilité du pieu).	/
Y	Le déplacement latéral du pieu	m
Y'	La rotation latérale du pieu	Rad
Y_0	Le déplacement latéral en tête du pieu	m
Y'_0	La rotation latérale en tête du pieu	Rad
Y_r	Profondeur de la zone neutre	m
Minuscule grecques		
γ	Le poids volumique du sol	$\frac{kN}{m^3}$
σ	L'écart type de loi normale de Gauss	kPa
σ'_h	La contrainte horizontale	kPa
σ_v	La contrainte verticale totale	kPa
σ'_v	La contrainte verticale effective	kPa
ϕ	L'angle de frottement interne de sol	$^\circ$

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les fondations profondes constituent un élément incontournable en génie civil, particulièrement dans les ouvrages soumis à des sollicitations latérales importantes tels que les ponts, les quais portuaires, les éoliennes offshore ou encore les bâtiments en zone sismique. Parmi ces fondations, les pieux jouent un rôle essentiel en transmettant les charges de la structure vers des couches de sol plus résistantes (**Zamoum, 2015**). Leur comportement sous charges horizontales est particulièrement complexe, car il est gouverné par l'interaction sol–structure, les propriétés mécaniques du sol, la rigidité du pieu et les conditions de chargement. Malgré les avancées des méthodes classiques, leur précision reste limitée face à la variabilité naturelle des sols. C'est pourquoi le recours à l'intelligence artificielle (IA) apparaît aujourd'hui comme une alternative prometteuse pour améliorer la prédiction du comportement des pieux latéralement chargés (**AOUADJ, s. d.**).

Les méthodes analytiques classiques telles que celles de Broms (1964), Brinch Hansen (1961) et Meyerhof (1995) permettent d'estimer la résistance latérale ultime des pieux, mais elles reposent sur des hypothèses simplificatrices qui limitent leur généralité. Les approches numériques par éléments finis sont plus précises, mais nécessitent un temps de calcul.

Ainsi que des méthodes de Reese et Matlock (1961) et Poulos et Davis (1980) qui permettent de déterminer la raideur initiale K_i . Par ailleurs, la classification du comportement du pieu : rigide, intermédiaire ou flexible ; selon la méthode de Poulos & Hull (1992) (**BOUAFIA, 2018**) montre que la rigidité relative sol–pieu est un paramètre fondamental, encore difficile à intégrer de façon unifiée dans les modèles de prédiction. Il existe donc un besoin réel de méthodes plus précises, rapides et adaptées à la diversité des configurations rencontrées en pratique.

L'objectif principal de cette étude est de développer et d'analyser des modèles de prédiction du comportement des pieux latéralement chargés dans le sable, en combinant les méthodes classiques de la géotechnique et une modélisation assistée par intelligence artificielle, afin d'améliorer la précision et l'efficacité du dimensionnement. Plus précisément, trois paramètres de réponse sont visés : la charge ultime H_u , la raideur initiale K_i et la charge $H(10\%B)$.

Pour y parvenir, une approche de régression en loi puissance multivariable, linéarisée par transformation logarithmique (**Foucart, 2006; Verdoolaege, 2015**); est appliquée sur une

Introduction générale

base de données expérimentale de soixante-seize pieux à petite échelle issus de la littérature internationale.

- **Le premier chapitre** présente une étude bibliographique approfondie du comportement des pieux isolés sous chargement latéral. Les principales méthodes de calcul classiques pour déterminer la valeur de la charge latérale ultime H_u y sont passées en revue, notamment les approches analytiques de Broms (1964), Brinch Hansen (1961) et Meyerhof (1995), ainsi que des méthodes de Reese et Matlock (1961) et Poulos et Davis (1980) de pour déterminer la raideur initiale K_i .
- **Le deuxième chapitre** décrit la base de données expérimentale utilisée dans cette étude, composée de soixante-seize pieux à petite échelle issus de travaux reconnus et il présente aussi une analyse statistique des paramètres géométriques et géotechniques sont également présentés.
- **Le troisième chapitre** est consacré à la classification des pieux selon leur rigidité relative, en appliquant la méthode de Poulos & Hull (1992). Les résultats révèlent une prédominance des comportements intermédiaires et flexibles au sein de la base de données étudiée.
- **Le quatrième chapitre** développe les modèles de prédiction en loi puissance pour les trois paramètres cibles. Les coefficients de régression sont déterminés séparément pour chaque catégorie de rigidité, et les performances des modèles sont évaluées à l'aide des nuages de points et des statistiques descriptives (*Besse, P. C., communication personnelle, s. d.*).
- **Le cinquième chapitre** L'efficacité du modèle d'intelligence artificielle proposé est finalement validée. par une analyse comparative avec les méthodes empiriques existantes dans la littérature, afin d'évaluer leur robustesse et leur capacité de généralisation.

Chapitre I

Étude bibliographique du comportement des pieux isolés sous chargement latéral

I.1 Introduction

Les fondations sont des éléments essentiels en génie civil, car elles assurent la transmission des charges des structures vers le sol et garantissent leur stabilité. Lorsque les caractéristiques mécaniques des couches superficielles sont insuffisantes pour supporter le poids de l'ouvrage, le recours aux fondations profondes, et plus particulièrement aux pieux, devient une nécessité technique.

Dans plusieurs cas, les pieux sont soumis non seulement à des charges verticales, mais aussi à des charges latérales dues au vent, aux séismes ou aux poussées du sol. L'étude de leur comportement sous ce type de sollicitations est complexe, car elle dépend fortement de l'interaction sol-structure et des caractéristiques du sol.

I.2 Définition des fondations

Les fondations sont les éléments structuraux assurant la transmission des charges d'un ouvrage vers le sol. Le choix du type de fondation est principalement conditionné par la capacité portante du sol naturel.

Lorsque les couches superficielles du sol ne présentent pas une capacité portante suffisante, on a recours à des fondations dites profondes, c'est-à-dire des pieux. **(Abdelkarim, 2022)**

I.3 Définition d'un pieu

Un pieu est un élément de fondation profonde, de forme élancée, destiné à transmettre les charges d'une structure vers des couches de sol plus résistantes, afin d'éviter la rupture du terrain et de limiter les déformations à des niveaux très faibles. Le terme « pieu » englobe également les puits et les barrettes. **(Zamoum, 2015)**

Il se constitue de trois parties principales :

- D'une tête
- D'une pointe
- D'un fût : compris entre la tête et la pointe.

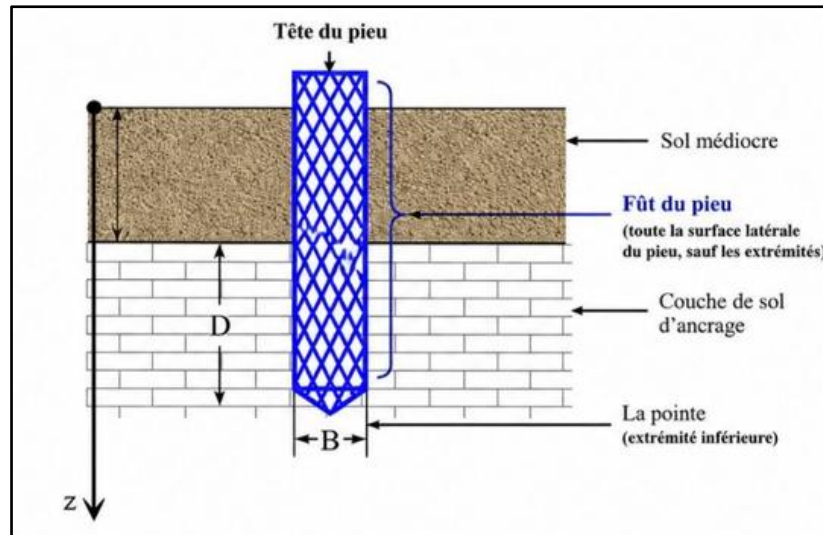


Figure 1: Définition d'un pieu (Zamoum, 2015)

I.4 Le rôle des pieux

Les pieux permettent de transférer et de résister aux charges de la structure vers le sol de différentes manières :

- **Des efforts verticaux** (comme par exemple le poids propre de la structure, les charges d'exploitation, ainsi que les charges climatiques telles que la neige).
- **Des efforts horizontaux ou latéraux** (par exemple les poussées des terres, l'action des vagues ou des courants, ainsi que les forces dues au vent sur les ouvrages). (Qaysar & Ilies, 2021)

I.5 Classification des pieux

Les pieux peuvent être classés de différentes façons selon les paramètres d'intérêt. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau 1, (adopté du Manuel Canadien d'Ingénierie des Fondations (MCIF 2006)).

Tableau 1: Classification des pieux (Adapté du Manuel canadien d'ingénierie des fondations (MCIF) 2006) (Abdelkarim, 2022)

Classification selon	Type de pieu
Mode d'installation	Battu, foré, vissé, foncé.
Nature de matériau	Acier (métallique), béton, bois, béton précontraint.
Géométrie et forme	Vertical /incliné
Rigidité	Long (flexible), court (rigide)
Type de structures	Bâtiment, les ponts, les quais portuaires, les éoliennes offshore
Déplacement du sol	Subissant un grand déplacement, un faible déplacement, ne subissant pas de déplacement

I.5.1 Classification des pieux selon le mode d'installation

Les pieux se classent principalement en deux catégories selon leur mode d'installation : les pieux battus et les pieux forés.

- ❖ Les **pieux battus** sont soit préfabriqués (en acier ou en béton armé), soit réalisés en place à l'aide d'un tube battu. Ils sont enfoncés dans le sol par battage ou vibration. Les pieux moulés battus consistent à introduire un tube dans le sol, puis à le remplir de béton lors de son extraction, avec ou sans armatures. (Laouet et al., 2021)
- ❖ Les **pieux forés** sont exécutés après réalisation d'un forage, avec ou sans soutènement des parois (tubage ou boue). Le béton est coulé à l'aide d'un tube plongeur après mise en place éventuelle des armatures. Parmi eux, les pieux à la tarière creuse se distinguent par une exécution rapide et économique, avec injection du béton lors du retrait de la tarière. (Laouet et al., 2021)
- ❖ **Les pieux foncés** : Ces pieux, généralement en béton armé préfabriqué ou en métal, sont installés par fonçage ou par vibro-fonçage. Cette dernière technique consiste à appliquer une vibration verticale régulière en tête du pieu, sous forme d'une force harmonique $F(t)$, générée par des masses excentrées (balourds) à l'intérieur du vibreur. Le vibreur est fixé à la tête du pieu à l'aide de mâchoires et contient des disques excentrés dont la rotation produit la force nécessaire à la pénétration. Le principe du vibro-fonçage repose sur le fait que les vibrations, notamment dans les sols granulaires, diminuent le frottement entre le sol et le pieu, facilitant ainsi sa pénétration ou son extraction. (Bouafia, 2026)

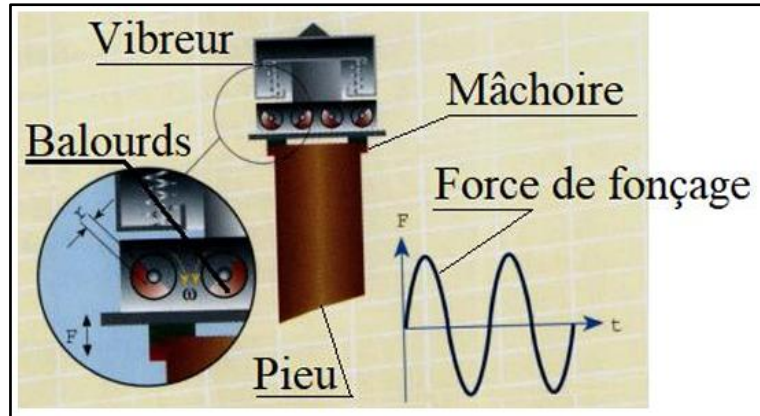


Figure 2: Schéma de vibro-fonçage d'un pieu métallique (Bouafia, 2026)

- ❖ **Les pieux vissés** : sont des éléments de fondation, généralement préfabriqués ou en acier, munis d'hélices. Leur mise en place s'effectue par vissage dans le sol à l'aide d'un dispositif mécanique fonctionnant sur le principe d'un tournevis. (Bouafia, 2026)



Figure 3 : Exemple de pieux vissés métalliques (Bouafia, 2026)

I.5.2 Classification selon les matériaux constitutifs

Les pieux peuvent être réalisés en bois, en acier ou en béton (armé ou non).

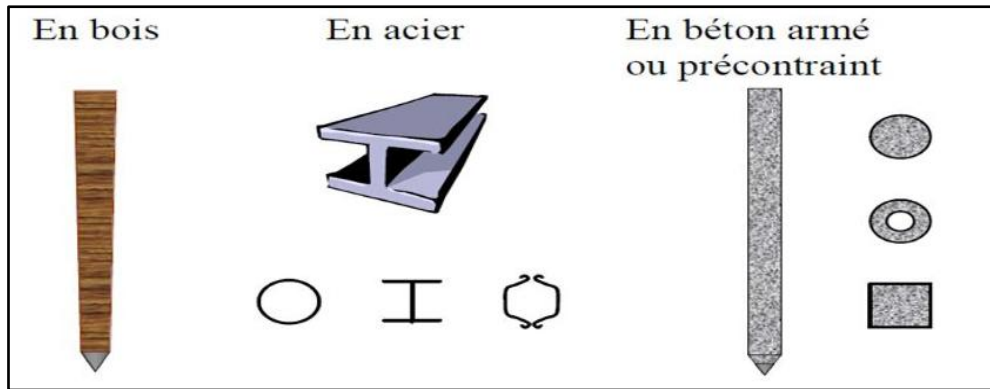


Figure 4: Les différents matériaux constitutifs (Boumaza Nour El Houda, 2015)

- ❖ **Pieux en bois** : utilisés surtout dans les régions où le bois est abondant et économique. Leur principal inconvénient est le risque de pourrissement lorsqu'ils sont soumis à des alternances d'immersion et d'émersion.
- ❖ **Pieux en acier** : se présentent sous forme de profilés, de tubes ou de palplanches. Ils sont faciles à manipuler et permettent d'atteindre de grandes longueurs. Toutefois, ils sont sensibles à la corrosion, ce qui nécessite des protections adaptées.
- ❖ **Pieux en béton** : les plus utilisés dans le monde. Ils sont bien adaptés aux efforts de compression. Le ferrailage est nécessaire dans les cas de manutention (pieux battus) ou lorsque le pieu est soumis à des efforts horizontaux. (Boumaza Nour El Houda, 2015)

I.6 Les méthodes de détermination de la charge latérale ultime (H_u)

I.6.1 Méthode de Broms 1964

Broms a proposé une méthode de calcul à l'état limite ultime pour les pieux isolés soumis à des charges latérales. Cette approche permet d'estimer à la fois les déplacements horizontaux et la résistance ultime du pieu.

L'auteur a établi des expressions analytiques et élaboré des abaques facilitant l'évaluation de la capacité portante latérale ultime H_{ult} . Ces outils prennent en compte la nature du sol (notamment les sols pulvérulents), le type de pieu (rigide ou flexible) ainsi que les conditions en tête (libre ou encastree).

Hypothèses simplificatrices

La méthode de Broms repose sur une approche classique dans laquelle le sol est supposé entièrement mobilisé à la rupture. Pour simplifier l'analyse, plusieurs hypothèses ont été adoptées, parmi lesquelles :

- La contrainte passive du sol en arrière du pieu est considérée comme négligeable et la pression ultime en avant du pieu est égale au produit de 3 fois la contrainte passive horizontale par le diamètre du pieu (ou la largeur) dans le cas d'un sol pulvérulent (figures 1 et 2) (**Broms, 1964**)

Sols pulvérulent

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Kp: Le coefficient de pression des terres

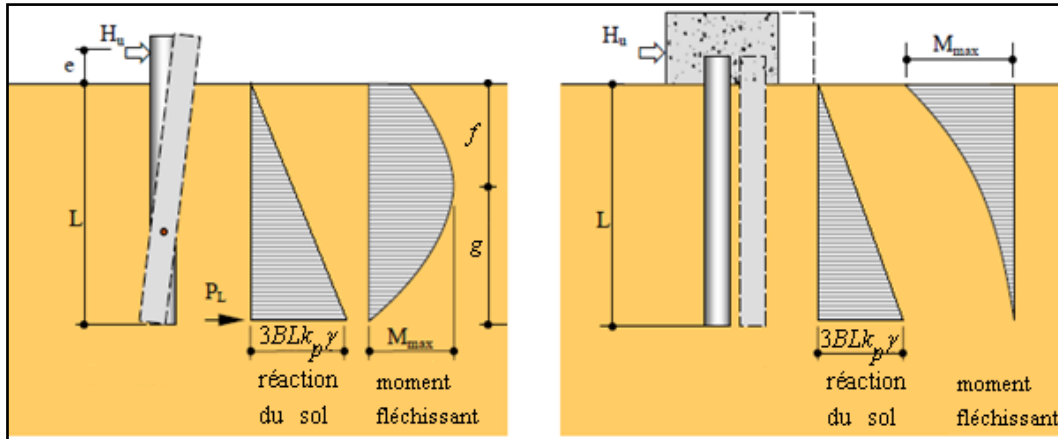


Figure 5: Pieu rigide dans un milieu pulvérulent (**Broms, 1964**)

On peut déterminer la capacité portante horizontale ultime H_{ult} d'un pieu, qu'il soit court ou long, en tenant compte des conditions aux limites, lorsqu'il est implanté dans un sol pulvérulent. Cette évaluation peut être réalisée soit à l'aide des valeurs présentées dans le tableau ci-dessous, soit en s'appuyant sur les schémas illustrés dans la figure ci-dessous.

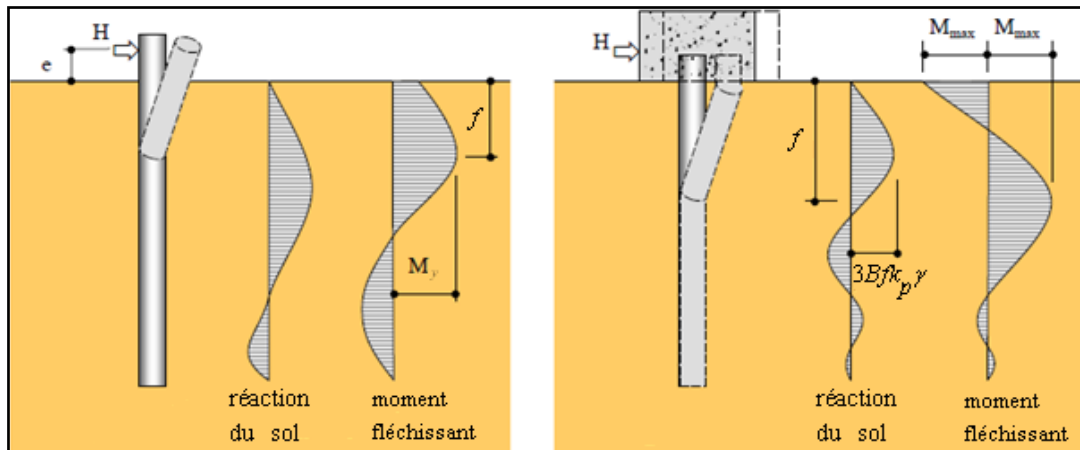


Figure 6: Pieu flexible dans un milieu pulvérulent (**Broms, 1964**)

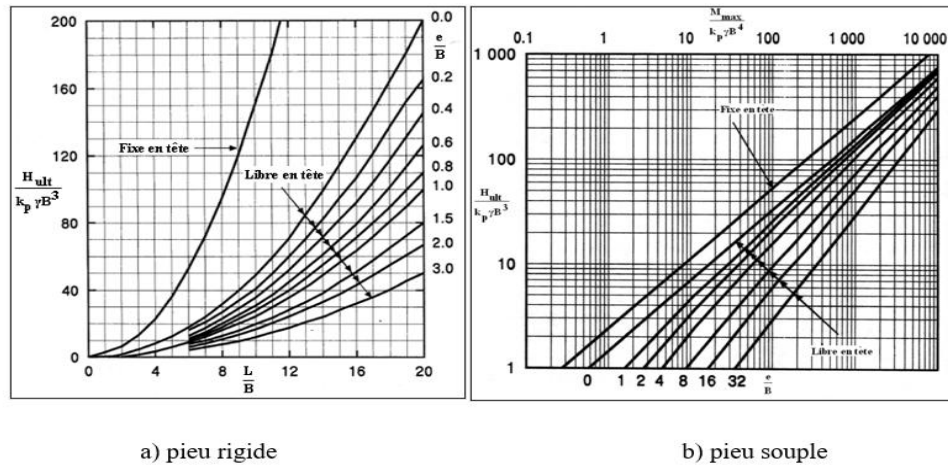


Figure 7: Résistance latérale ultime de pieu rigide et de pieu souple dans un sol pulvérulent (**Broms, 1964**)

Tableau 2: Les équations pour le calcul de H_u dans un sol pulvérulent (**Broms, 1964**)

Type de pieu	Type de tête	Capacité horizontale H_{ult}
Rigide	Libre	$H_{ult} = \frac{0.5\gamma BL^3 K_p}{e + L}$ $M_{max} = H_{ult} \left(e + \frac{2f}{3} \right)$ $f = 0.82 \sqrt{\frac{H_{ult}}{\gamma BK_p}}$
	Fixe	$H_{ult} = 1.5\gamma BK_p L^2$ $M_{max} = \frac{2}{3} H_{ult} L = L^3 BK_p \gamma$
Souple	Libre	$H_{ult} = \frac{3}{2} \gamma BK_p f^2$
	Fixe	$H_{ult} = \frac{2M_y}{e + \frac{2f}{3}}$ $M_{max} = \frac{(0.5\gamma BL^3 K_p) \left(e + \frac{2}{3} f \right)}{\frac{2}{3} f + e + 2L}$

La méthode semi-empirique repose sur l'analyse du comportement du sol à l'état de rupture, ce qui met en évidence le rôle de la pression horizontale ultime. Cette dernière a été estimée par plusieurs chercheurs, notamment Broms en 1964. Toutefois, ces approches

présentent une limite importante, car elles ne permettent pas d'évaluer les déplacements des pieux.

En pratique, la méthode de Broms est largement utilisée et fournit des résultats satisfaisants, en particulier pour les pieux courts considérés comme rigides.

I.6.2 Méthode de Brinch Hansen (1961)

Dans cette méthode, les paramètres inconnus sont la profondeur du centre de rotation deux paramètres principaux sont inconnus : la profondeur du centre de rotation z_R et la valeur de la charge horizontale ultime H_u . Ces grandeurs sont déterminées en appliquant les conditions d'équilibre statique, à savoir l'équilibre des forces horizontales et l'équilibre des moments. **(Hansen, 1961)**

Par ailleurs, Brinch Hansen a proposé une formulation permettant de calculer la réaction ultime du sol à une profondeur quelconque z , valable pour un sol cohérent ou un sol pulvérulent comme suit:

$$P_u(z) = \sigma'_v K_{qz} + C' K_{cz} \quad \textbf{(Hansen, 1961)}$$

La profondeur du centre de rotation z_R : $z_R = 0.5 \left(\frac{H_{ult}}{P_{uB}} + L \right)$

K_{qz} et K_{cz} : Coefficient de la résistance latérale dépendent du rapport de la profondeur sur le diamètre de pieu (la profondeur relative) $\frac{z}{B}$, et l'angle de frottement interne ϕ (voir figure).

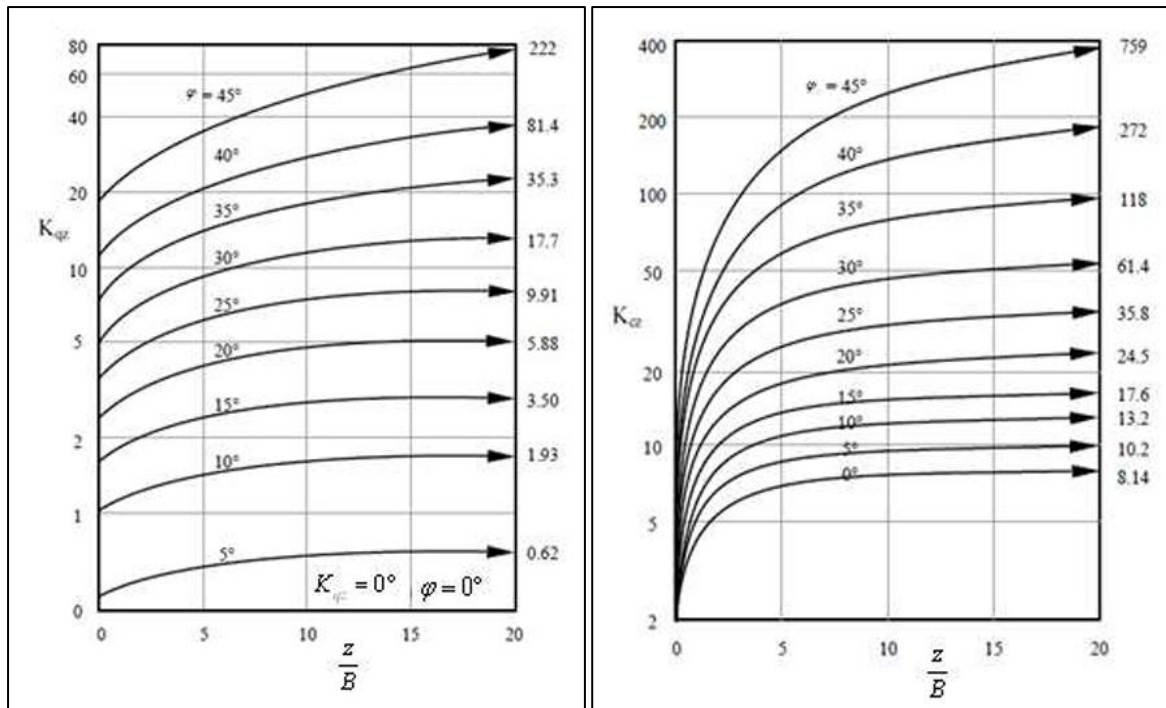


Figure 8: Les coefficients de la résistance latérale (Hansen, 1961)

I.6.3 Méthode de Meyerhof (1995)

La méthode proposée par G.G. Meyerhof permet d'estimer la charge latérale ultime d'un pieu soumis à un chargement horizontal dans un sol sableux à partir des résultats de l'essai SPT et des dimensions du pieu. (Meyerhof, 1995)

Cette méthode est basée sur l'utilisation des valeurs du SPT pour évaluer la résistance du sol autour du pieu. Meyerhof considère également le comportement du pieu comme celui d'un pieu rigide équivalent afin de simplifier l'analyse du problème. (Meyerhof, 1995)

Le principe consiste à :

- l'utilisation des résultats de l'essai SPT pour représenter la résistance du sol ;
- l'assimilation du comportement du pieu à un **pieu rigide équivalent** ;
- l'équilibre entre la charge horizontale appliquée et la pression latérale mobilisée par le sol autour du pieu.

L'auteur a établi des corrélations simples entre :

- la pression limite du sol,
- la résistance latérale,
- et les valeurs du SPT.

Formule de la charge latérale ultime Q_n

Pour un pieu libre en tête (free-head pile), la résistance latérale ultime est donnée par : (Meyerhof, 1995)

$$Q_n = 0.12\gamma BD_{eu}^2 K_{br}$$

Q_n : Charge latérale ultime (kN)

γ : Poids volumique moyen du sol (kN/m^3)

B : Diamètre du pieu (m)

D_{eu} : Profondeur efficace du pieu équivalent rigide (m)

K_{br} : Coefficient résultant de pression latérale du sol sur le fût du pieu. ($K_{br} = K_p$)

K_0 : Coefficient de pression des terres au repos

$$K_0 = 1 - \sin \varphi$$

φ : Angle de frottement

Cette méthode est surtout utilisée pour des estimations préliminaires des pieux soumis à des charges latérales dans les sols sableux.

I.7 Les méthodes de détermination de la raideur initiale (Ki)

I.7.1 Méthode de Reese et Matlock (1961)

La technique selon Reese et Matlock (1961) repose sur le modèle de Winkler, qui suppose que le sol peut être modélisé par des ressorts indépendants entourant le pieu. En fait, chaque ressort se déforme avec un effort latéral proportionnel à son déplacement horizontal. La relation entre le pieu et le sol est définie grâce aux courbes $p - y$, dans lesquelles p est la force latérale du sol et y est le déplacement horizontal du pieu. (Reese, 1965)

Loi de la raideur initiale : Relation dérivée de la théorie de Matlock & Reese (1961)

$$Ki = \frac{EI}{3.43T^3}$$

$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{0.2}$$

$$n_h = (2 + 38Dr) \times 10^3$$

Ki : Raideur initiale du système sol-pieu (N/mm).

EI : Module d'élasticité du matériau du pieu ($N.mm^2$).

T : La longueur de transfert (ou facteur de flexibilité du pieu).

n_h : Coefficient caractérisant la rigidité latérale du sol (N/mm^3).

Dr : Densité relative (%).

I.7.2 Méthode Poulos et Davis (1980) :

La méthode de Poulos et Davis repose sur une approche élastique, en partant de la théorie du continuum. Ici, le sol est traité comme un milieu élastique continu qui enveloppe le pieu – une différence notable avec la méthode de Winkler, qui elle, utilise des ressorts indépendants. **(Poulos & Davis, 1980)**

Cette méthode sert à analyser l'interaction entre le sol et le pieu quand ce dernier subit une charge latérale. Concrètement, elle permet de déterminer: **(Poulos & Davis, 1980)**

Le déplacement horizontal du pieu,

Les moments fléchissants,

La raideur initiale, notée Ki .

Pour commencer, la méthode introduit ce qu'on appelle la longueur de transfert (ou facteur de flexibilité du pieu).

$$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{0.2}$$

EI : Module d'élasticité du matériau du pieu ($N.mm^2$).

n_h : Coefficient caractérisant la rigidité latérale du sol (N/mm^3).

Loi de raideur initiale : Relation dérivée à partir de la théorie élastique de Poulos et Davis (1980).

$$Ki = \frac{1.075T}{T^3/EI}$$

I.8 Les essais en modèles réduits à 1g en laboratoire

Les essais en modèles réduits réalisés à **1g en laboratoire**, généralement en cuve, constituent une approche expérimentale permettant d'étudier le comportement des pieux soumis à des charges latérales dans un environnement contrôlé. Ces essais visent à reproduire, à une échelle réduite, l'interaction sol–structure afin d'analyser la réponse du pieu en termes de déplacements et de rigidité.

1. **Préparation du massif de sol :** Construire le massif de sol en laboratoire de façon homogène et contrôlée, avec une densité bien définie et reproductible.
2. **Calibrage du modèle :** Vérifier le bon fonctionnement des instruments et déterminer les paramètres mécaniques réels du modèle avant les essais.
3. **Installation du modèle dans le sol :** Mettre en place le modèle dans le massif de sol dans des conditions bien définies et contrôlées.
4. **Mise en place du système de chargement :** Installer le dispositif permettant d'appliquer la charge souhaitée sur le modèle de façon progressive et contrôlée.
5. **Mise en place du système de mesure :** Installer tous les instruments de mesure des déplacements et des déformations avant le début du chargement.
6. **Réalisation de l'essai et acquisition des données :** Appliquer le chargement et enregistrer automatiquement toutes les mesures en temps réel. (*Bouafia et al., 1996*)

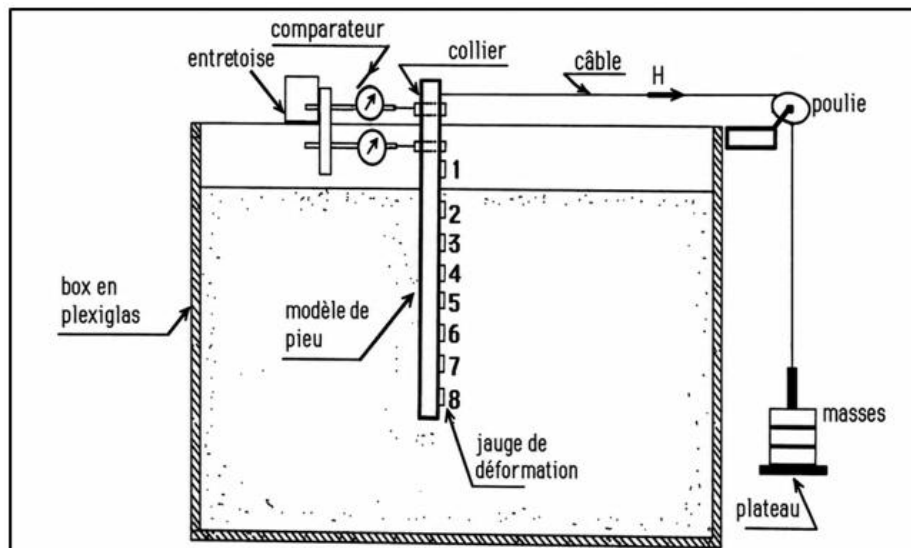


Figure 9: Conteneur d'essai sur modèles de pieux (*Bouafia et al., 1996*)

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a posé les bases théoriques pour comprendre comment se comportent les pieux quand ils subissent des charges latérales. On a passé en revue les principales méthodes d'analyse pour calculer la charge ultime – comme celles de Broms, Brinch Hansen ou Meyerhof – ainsi que les approches pour estimer la raideur initiale, notamment les méthodes de Reese et Matlock, ou encore celles de Poulos et Davis dans des sols sableux. Ce qu'on a vu, c'est que le comportement des pieux est surtout influencé par l'interaction entre le sol et le pieu, et par les caractéristiques mécaniques de l'ensemble. Enfin, les essais réalisés sur des modèles réduits ont bien montré à quel point les données expérimentales sont essentielles pour mieux saisir et modéliser ce comportement plutôt complexe.

Chapitre II

Présentation de la base de données d'essais de chargement des pieux

II.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude géotechnique consacrée à l'analyse du comportement des pieux, la mise en place d'une base de données structurée a constitué une étape essentielle afin de regrouper, organiser et exploiter efficacement l'ensemble des informations disponibles.

Cette base de données comprend 76 pieux à têtes libres (Free Head), issus d'essais réalisés à petite échelle (Small-Scale), en conditions de chargement latéral statique, Chacun identifié individuellement et caractérisé par un ensemble de paramètres géométriques, notamment leur longueur, leur diamètre et leur longueur d'ancrage, de propriétés géotechniques des sols sableux dans lesquels ils sont implantés, de conditions de chargement appliquées. Elle a été élaborée à partir de résultats expérimentaux provenant de différents laboratoires à travers le monde entier (18 laboratoires) (USA, Canada, Chine, Algérie, Inde, Iraq, Australie, Corée du Sud...), ce qui permet de disposer d'un ensemble de données riche, varié et représentatif de diverses conditions d'essai.

II.2 Description des pieux

Le comportement des pieux résulte d'une interaction complexe entre la géométrie de l'élément structural, les propriétés mécaniques du sol et les conditions de chargement appliquées.

II.2.1 Géométrie des pieux

Le tableau ci-dessous présente les paramètres géométriques et mécaniques retenus pour l'analyse de comportement des pieux dans le cadre de cette étude :

Tableau 3: Les paramètres géométriques des pieux

Nom du pieu	Matériau du pieu	Méthode d'installation	Longueur d'ancrage $D(mm)$	Diamètre $B(mm)$	D/B	Excentricité $e(mm)$	Rigidité en flexion $EI(N. mm^2)$
D/B=11	Cuivre	Battu (Driven)	151.5	14	10.82	175.5	130000000
D/B=27	Cuivre	Battu (Driven)	374	14	26.71	175	130000000
D/B=30	Cuivre	Battu (Driven)	418	14	29.86	175	130000000
25.4_WOS_200	Aluminium	Foré (Bored)	1000	25.4	39.37	200	1318764392.4*
25.4_WOS_400	Aluminium	Foré (Bored)	800	25.4	31.5	400	1318764392.4*
25.4_WOS_600	Aluminium	Foré (Bored)	600	25.4	23.62	600	1318764392.4*
25.4_WOS_800	Aluminium	Foré (Bored)	400	25.4	15.75	800	1318764392.4*
L/D=20	Aluminium	Pieu installé après traitement du sol	400	20	20	0	175000000
L/D=25	Aluminium	Pieu installé après traitement du sol	500	20	25	0	175000000
L/D=30	Aluminium	Pieu installé après traitement du sol	600	20	30	0	175000000
1	Acier	Préinstallé (Pre-installed)	300	12	25	1234.6	33400000
5	Acier	Préinstallé (Pre-installed)	300	12	25	1234.6	33400000
Test 1	Acier	Foré (Bored (1-lift))	812.8	34.6	23.49	127	14034000000
Test 3	Acier	Foré (Bored (6-lift))	812.8	34.6	23.49	127	14034000000
Test 4	Acier	Foré (Bored (1-lift))	812.8	34.6	23.49	254	14034000000
Test 6	Acier	Foré (Bored (6-lift))	812.8	34.6	23.49	254	14034000000
Test 7	Acier	Foré (Bored (1-lift))	812.8	34.6	23.49	254	14034000000
Test 9	Acier	Foré (Bored (6-lift))	812.8	34.6	23.49	254	14034000000
Test 10	Acier	Foré (Bored (1-lift))	812.8	34.6	23.49	254	14034000000
Test 12	Acier	Foré (Bored (6-lift))	812.8	34.6	23.49	254	14034000000
Horizontal, Dr=30%	Aluminium	Pieu installé après traitement du sol	636.5	25.4	25.06	75	399793780.4*
Horizontal, Dr=45%	Aluminium	Pieu installé après traitement du sol	763.8	25.4	30.07	75	399793780.4*

Horizontal, Dr=70%	Aluminium	Pieu installé après traitement du sol	891.1	25.4	35.08	75	399793780.4*
Free head driven pile	Aluminium	Battu (Driven)	500	18.2	27.47	10	86000000
Dry (40%)	Aluminium	Préinstallé (Pre-installed)	950	30	31.67	300	1212416800
Dry (70%)	Aluminium	Préinstallé (Pre-installed)	950	30	31.67	300	1212416800
Dry (90%)	Aluminium	Préinstallé (Pre-installed)	950	30	31.67	300	1212416800
Sat (40%)	Aluminium	Préinstallé (Pre-installed)	950	30	31.67	300	1212416800
Sat (70%)	Aluminium	Préinstallé (Pre-installed)	950	30	31.67	300	1212416800
73 mm Diameter Circular Pile	Acier	Poussé (Pushed)	730	73	10	170	129800000000
90 mm Diameter Circular Pile	Acier	Poussé (Pushed)	800	90	8.89	250	284000000000
102 mm Diameter Circular Pile	Acier	Poussé (Pushed)	900	102	8.82	280	418000000000
73 mm Square Pile	Acier	Poussé (Pushed)	730	73	10	170	202000000000
Pile in sand	Acier	Procédé d'enfouissement (Burial process)	991	75	13.21	75	174611318000*
Horizontal ground	Aluminium	Technique de pluviation du sable (Sand raining technique)	500	25	20	100	416000000
Horizontal ground	Aluminium	Technique de pluviation du sable (Sand raining technique)	500	25	20	100	416000000
Horizontal ground	Aluminium	Technique de pluviation du sable (Sand raining technique)	500	25	20	100	416000000
6D90	Acier	Foré (Drilled)	312	52	6	0	10761784800*
6L90	Acier	Foré (Drilled)	312	52	6	0	10761784800
6M90	Acier	Foré (Drilled)	312	52	6	0	10761784800
9L90	Acier	Foré (Drilled)	468	52	9	0	10761784800*
9M90	Acier	Foré (Drilled)	468	52	9	0	10761784800*

P1	Acier	Pluviation du sol autour du pieu (Raining soil around the pile)	1394	102	13.67	98	462971910051.84
Pile in loose sand	Plexiglas	Encastré (Embedded)	210	10	21	20	50000000
Pile in dense sand	Plexiglas	Encastré (Embedded)	210	10	21	20	50000000
2_1	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	304.8	76.2	4	70	49623890993.96
2_2	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	609.6	76.2	8	70	49623890993.96
2_3	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	350.52	76.2	4.6	70	49623890993.96
2_4	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	685.8	76.2	9	70	49623890993.96
3_1	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	685.8	76.2	9	70	49623890993.96
3_2	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	457.2	76.2	6	70	49623890993.96
3_3	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	457.2	76.2	6	70	49623890993.96
3_4	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	655.32	76.2	8.6	70	49623890993.96
4_1	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	912	152	6	80	785679244800
5_1	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	457.2	76.2	6	70	49623890993.96
5_3	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	457.2	76.2	6	70	49623890993.96
6_1	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	457.2	76.2	6	70	49623890993.96
6_2	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	685.8	76.2	9	70	49623890993.96
6_3	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	457.2	76.2	6	70	49623890993.96
6_4	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	685.8	76.2	9	70	49623890993.96
8_1	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	685.8	76.2	9	70	49623890993.96
8_2	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	685.8	76.2	9	70	49623890993.96
8_3	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	685.8	76.2	9	686	49623890993.96

9_4	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	457.2	76.2	6	457	49623890993.96
10_1	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	1368	152	9	80	785679244800
14_1	Béton	Coulé en place (Cast-in-situ)	457.2	76.2	6	686	49623890993.96
TS1	Aluminium	Vériné (Jacked)	500	32	15.63	115	1172135015.63
TC1 (1 cycle)	Aluminium	Vériné (Jacked)	500	32	15.63	115	1172135015.63
TC2 (1 cycle)	Aluminium	Vériné (Jacked)	500	32	15.63	115	1172135015.63
D05	Acier	Battu (Driven)	210	12	17.5	49	33000000
D08	Acier	Battu (Driven)	210	12	17.5	49	33000000
D10	Acier	Battu (Driven)	210	12	17.5	49	33000000
P03	Acier	Préinstallé (Pre-installed)	210	12	17.5	49	33000000
Id=0.25	Acier	Pluviation du sol autour du pieu (Raining soil around the pile)	612	102	6	150	415800000000
Id=0.5	Acier	Pluviation du sol autour du pieu (Raining soil around the pile)	612	102	6	150	415800000000
Id=0.75	Acier	Pluviation du sol autour du pieu (Raining soil around the pile)	612	102	6	150	415800000000

(*) : Les valeurs de rigidité en flexion ***EI*** marquées par un astérisque ont été **calculées** à partir des propriétés mécaniques et géométriques des pieux (module d'élasticité ***Ep***, qui est une propriété intrinsèque du matériau constituant le pieu (comme l'acier, l'aluminium ou le béton mentionnés dans le tableau) et moment d'inertie ***Ip*** qui dépend de la géométrie du pieu.), et non directement extraites des données expérimentales.

La formule fondamentale est la suivante : **$EI = EpIp = Ep \times \frac{\pi}{64} \times B^4$**

Exemple :

Le pieu **6L90** est un pieu en **acier** avec une **longueur d'ancrage** $D = 312 \text{ mm}$, un **diamètre** $B = 52 \text{ mm}$, ce qui correspond à un rapport $D/B = 6$, une **excentricité** $e = 0 \text{ mm}$, ce qui signifie que la charge est appliquée sans moment initial en tête. Et une **rigidité en flexion** $EI = 10\,761\,784\,800 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ où **$Ep = 210\,000 \text{ N/mm}^2$** pour l'acier et **$Ip = \frac{\pi}{64} \times B^4$** ce qui donne **$Ip = 3,59 \times 10^5 \text{ mm}^4$** .

II.2.2 Analyse statistique des paramètres géométriques

- Le tableau suivant présente une synthèse statistique des paramètres géométriques des pieux considérés dans cette étude. Les indicateurs retenus permettent de caractériser la dispersion et les valeurs représentatives de chaque paramètre.

Tableau 4: Statistiques descriptives des paramètres géométriques des pieux

	<i>D(mm)</i>	<i>B(mm)</i>	<i>D/B</i>	<i>e(mm)</i>	<i>EI(N.mm²)</i>
n	76	76	76	76	76
Moyenne	606.036	50.2711	16.5164	183.193	7.39×10^{10}
Ecart type	260.984	32.8859	9.48138	238.7	1.61×10^{11}
Min	151.5	10	4	0	33000000
25%	457.2	25.4	8.76765	70	416000000
50%	604.8	34.6	15.625	99	1.2×10^{10}
75%	812.8	76.2	23.4913	254	4.96×10^{10}
Max	1394	152	39.3701	1234.57	7.86×10^{11}

- Les figures suivantes présentent les histogrammes relatifs aux paramètres géométriques des pieux étudiés, notamment la longueur ***D***, le diamètre ***B***, le rapport ***D/B***, l'excentricité ***e*** ainsi que la rigidité en flexion ***EI***. Ces représentations permettent d'analyser la distribution des données et d'évaluer leur dispersion :

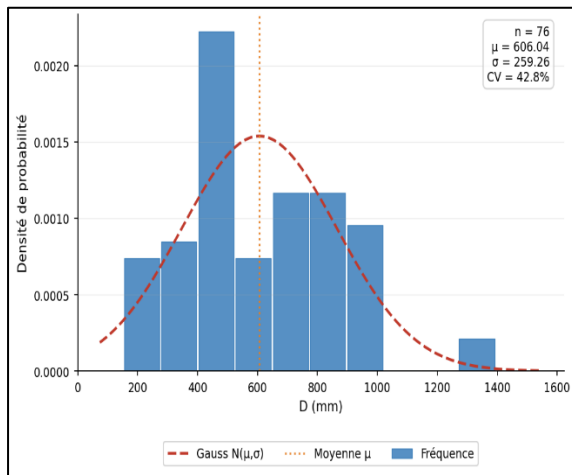


Figure 10: Distribution statistique de la longueur d'ancrage D

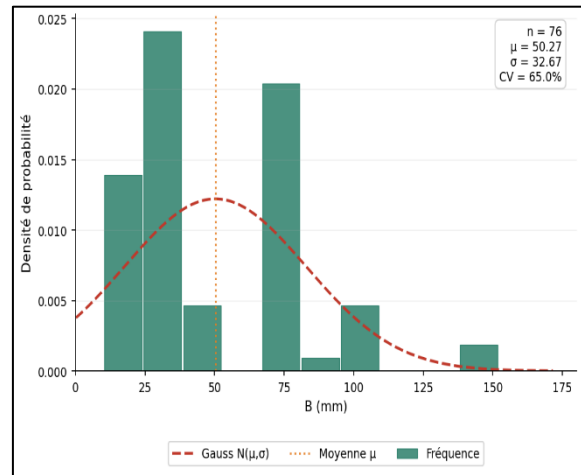


Figure 11: Distribution statistique du diamètre B

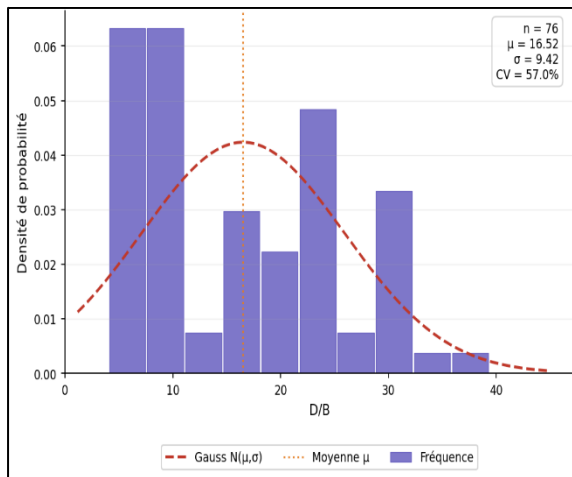


Figure 12: Distribution statistique du rapport D/B

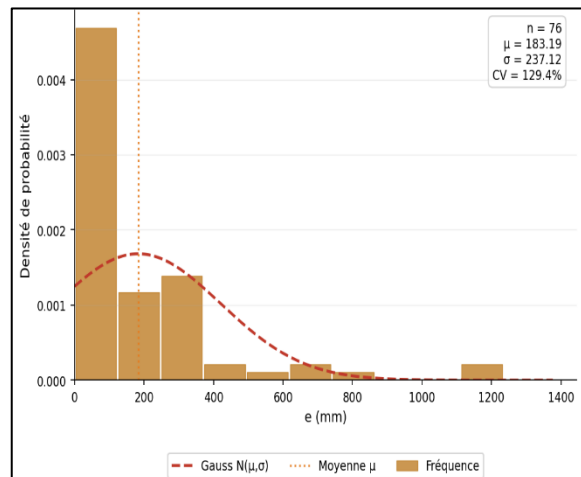


Figure 13: Distribution statistique de l'excentricité e

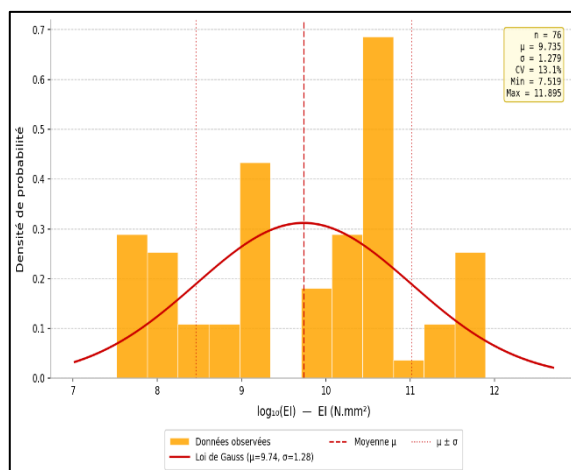


Figure 14: Distribution statistique de la rigidité en flexion EI

Interprétation :

- **Longueur d'ancrage D (mm) :** Distribution légèrement asymétrique à droite ($CV = 42,8 \%$). Les diamètres des pieux sont principalement concentrés entre 300 et 950 mm. Une loi normale fournit une approximation acceptable de la distribution.
 - **Diamètre B (mm) :** La distribution des diamètres B présente une variabilité importante autour de la moyenne de 50,27 mm. Les valeurs sont principalement regroupées dans les faibles diamètres, tandis que quelques diamètres plus élevés génèrent une asymétrie vers la droite et augmentent la dispersion globale des données ($CV = 65,0 \%$).
 - **Élancement D/B :** Distribution bimodale ($CV = 57,0 \%$), caractérisée par deux populations distinctes de pieux à faible et à fort élancement, reflétant des comportements structuraux différents.
 - **Excentricité e (mm) :** La distribution est fortement asymétrique à droite ($CV = 129,4 \%$). La majorité des essais présente de faibles valeurs d'excentricité, tandis que quelques valeurs extrêmes atteignent environ 1235 mm.
 - **Rigidité en flexion EI ($N \cdot mm^2$) :** Distribution modérément dispersée ($CV = 13,1 \%$). Dépend du matériau et de B^4 , ce qui peut amplifier les écarts de rigidité.
- Le diagramme circulaire (appelé aussi **camembert statistique** ou **Pie Chart** en anglais) montre la répartition des matériaux utilisés. On remarque que l'acier représente la plus grande proportion avec **37 %**, ce qui indique qu'il est le matériau dominant grâce à sa résistance mécanique élevée. L'aluminium occupe la deuxième place avec **29 %**, suivi du béton avec **27 %**, montrant leur importance dans la structure ou la conception étudiée. En revanche, le cuivre (**4 %**) et le plexiglas (**3 %**) sont utilisés en faibles quantités, probablement pour des applications spécifiques ou secondaires. Cette répartition met en évidence la prédominance des matériaux métalliques par rapport aux autres matériaux.

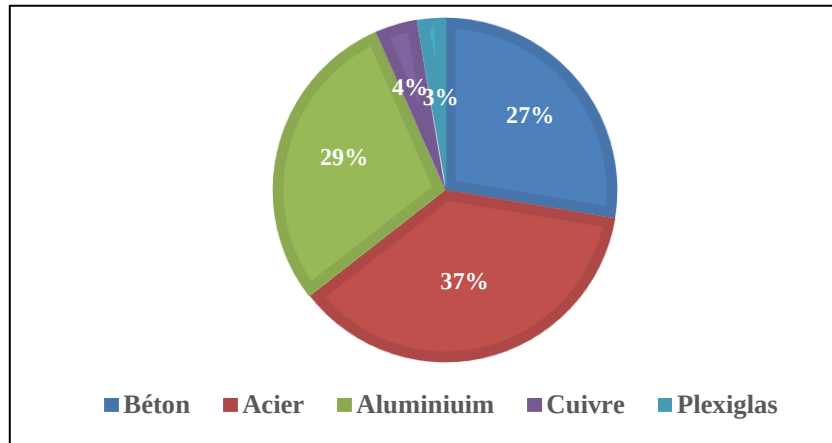


Figure 15: Répartition des pieux selon le matériau

II.2.3 Propriétés du sol des pieux

- Le tableau suivant regroupe les paramètres géotechniques du sol utilisés dans cette étude :

Tableau 5: Les propriétés du sol des pieux

No	Site	Nom du pieu	Densité du sol	γ (kN/m^3)	φ (°)	Dr (%)
S1	Laboratoire ENSH (Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique), Blida, Algérie	D/B=11	Sable moyen	16.2	31.4	48.3
		D/B=27	Sable moyen	16.2	31.4	48.3
		D/B=30	Sable moyen	16.2	31.4	48.3
S2	NIT Trichy (Lab. Study), India	25.4_WOS_200	Sable lâche	15.65	32	30
		25.4_WOS_400	Sable lâche	15.65	32	30
		25.4_WOS_600	Sable lâche	15.65	32	30
		25.4_WOS_800	Sable lâche	15.65	32	30
S3	Laboratory at Mustansiriyah University, Iraq Baghdad	L/D=20	Sable moyen	17	37	65
		L/D=25	Sable moyen	17	37	65
		L/D=30	Sable moyen	17	37	65
S4	Laboratory model test setting (Kyungpook National University), South Korea	1	Sable moyen	13.14	35	62
		5	Sable dense	13.73	40	90
S5	Texas A&M University Laboratories, College Station, TX, USA	Test 1	Sable moyen	17.47	44.40	72.25
		Test 3	Sable moyen	17.55	44.40	72.25
		Test 4	Sable moyen	17.47	44.40	72.25
		Test 6	Sable moyen	17.55	44.40	72.25
		Test 7	Sable moyen	17.47	44.40	72.25
		Test 9	Sable moyen	17.55	44.40	72.25
		Test 10	Sable moyen	17.47	44.40	72.25

		Test 12	Sable moyen	17.55	44.40	72.25
S6	Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, India	Horizontal, Dr=30%	Sable lâche	16	34.05	30.00
		Horizontal, Dr=45%	Sable moyennement dense	16.66	36.41	45.00
		Horizontal, Dr=70%	Sable dense	17.6	40.85	70.00
S7	Laboratory, Technical University of Nova Scotia, Canada	Free head driven pile	Sable moyen	16.11	39.00	60.00
S8	Seoul National University, South Korea	Dry (40%)	Sable lâche	14.1	35.60	40.00
		Dry (70%)	Sable moyen	14.95	40.85	70.00
		Dry (90%)	Sable très dense	15.6	48.48	90.00
		Sat (40%)	Sable lâche	18.57	35.60	40.00
		Sat (70%)	Sable moyen	19.12	40.85	70.00
S9	Laboratory facility at the Faculty of Engineering & Applied Science, Memorial University of Newfoundland, St. John's, Canada	73 mm Diameter Circular Pile	Sable dense	14.81	41.20	77.00
		90 mm Diameter Circular Pile	Sable dense	14.81	41.20	77.00
		102 mm Diameter Circular Pile	Sable dense	14.81	41.20	77.00
		73 mm Square Pile	Sable dense	14.81	41.20	77.00
S11	National Institute of Technology, Tiruchirappalli, India	Horizontal ground	Sable lâche	15.99	35.00	30.00
		Horizontal ground	Sable lâche	16.3	35.00	45.00
		Horizontal ground	Sable lâche	17.03	35.00	70.00
S12	Geotechnical Engineering Group, Cornell University, Ithaca, New York, USA	6D90	Sable dense	17.54	49.20	77.10
		6L90	Sable lâche	15.44	35.60	17.10
		6M90	Sable moyennement dense	16.21	40.20	40.00

		9L90	Sable lâche	15.44	35.60	17.10
		9M90	Sable moyennement dense	16.21	40.20	40.00
S13	Lehigh University, USA	P1	Sable lâche	16.5	38.00	32.00
S14	Shenzhen/Hefei/Lanzhou, China	Pile in loose sand	Sable moyen	14.55	31.00	50.00
		Pile in dense sand	Sable dense	15.54	31.00	80.00
S15	Geotechnical laboratory at Cornell University, Ithaca, New York, USA	2_1	Sable moyen	16.84	42.30	62.12
		2_2	Sable moyen	16.84	41.40	57.53
		2_3	Sable moyen	16.84	41.80	59.59
		2_4	Sable moyen	16.84	41.40	57.53
		3_1	Sable moyen	16.5	41.40	57.53
		3_2	Sable moyen	16.5	41.70	59.08
		3_3	Sable moyen	16.5	41.70	59.08
		3_4	Sable moyen	16.5	41.40	57.53
		4_1	Sable moyennement dense	16.45	41.30	57.00
		5_1	Sable dense	17.45	47.70	86.77
		5_3	Sable dense	17.45	47.70	86.77
		6_1	Sable lâche	17.45	38.10	64.08
		6_2	Sable lâche	17.45	37.90	62.57
		6_3	Sable lâche	15.47	38.10	64.08
		6_4	Sable lâche	15.47	37.80	61.82
		8_1	Sable moyen	16.65	41.40	57.53
		8_2	Sable moyen	16.65	41.40	57.53
		8_3	Sable moyennement dense	16.65	41.40	57.53

		9_4	Sable moyennement dense	16.32	41.70	59.08
		10_1	Sable moyennement dense	16.44	40.90	54.89
		14_1	Sable moyennement dense	16.1	41.70	59.08
S16	Griffith University, Australia	TS1	Sable moyen	16.27	35.00	40.31
		TC1 (1 cycle)	Sable moyen	16.27	35.00	40.31
		TC2 (1 cycle)	Sable moyen	16.27	35.00	40.31
S17	Hwawon area, located near the Nak-Dong River in Daegu, South Korea	D05	Sable dense	13.74	41.42	73.00
		D08	Sable dense	13.74	41.42	73.00
		D10	Sable dense	13.74	41.42	73.00
		P03	Sable dense	13.74	41.42	73.00
S18	Memorial University of Newfoundland, St. John's., Canada	Id=0.25	Sable lâche	16.5	33.30	25.00
		Id=0.5	Sable moyen	17.3	39.00	50.00
		Id=0.75	Sable dense	18.3	43.00	75.00

Dr : Densité relative du sol (%).

γ : Poids volumique du sol (kN/m^3).

φ : Angle de frottement interne ($^\circ$).

Example

L'environnement géotechnique dans lequel le pieu **6L90** est testé consiste en un **sable lâche** (Loose sand). Ce sol est caractérisé par un poids volumique (γ) **de 15.44 kN/m^3** et une densité relative (Dr) **de 17, 10 %**. La résistance au cisaillement du sol est définie par un angle de frottement interne (φ) **de 35, 60°**.

II.2.4 Analyse statistique des propriétés du sol des pieux

- Le tableau suivant regroupe les résultats de l'analyse statistique des propriétés géotechniques des sols considérées dans cette étude. Cette analyse porte principalement sur l'angle de frottement interne(φ), la densité relative (Dr) ainsi que le poids volumique(γ), qui représente des paramètres essentiels dans l'évaluation du comportement latéral des pieux en sols granulaires.

Tableau 6: Statistiques descriptives des propriétés géotechniques du sol des pieux

	γ (kN/m^3)	φ ($^\circ$)	Dr (%)
n	76	76	76
Moyenne	16.168729	39.311717	58.595792
Ecart type	1.235119	4.512492	17.522433
Min	13.14	31.00	17.10
25%	15.47	35.60	47.475
50%	16.2950	40.85	59.795577
75%	17.00	41.70	72.245130
Max	19.123291	49.20	90.00

- La figure suivante présente les histogrammes des principaux paramètres géotechniques du sol, à savoir le poids volumique γ , la densité relative Dr ainsi que l'angle de frottement interne φ . Ces histogrammes permettent d'analyser la répartition et la dispersion des valeurs utilisées dans cette étude.

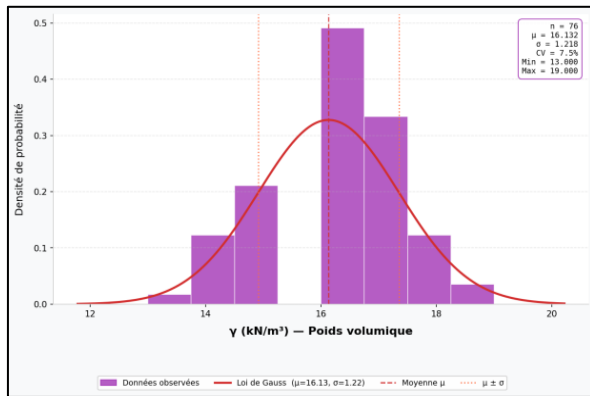


Figure 16: Statistique descriptive du poids volumique γ

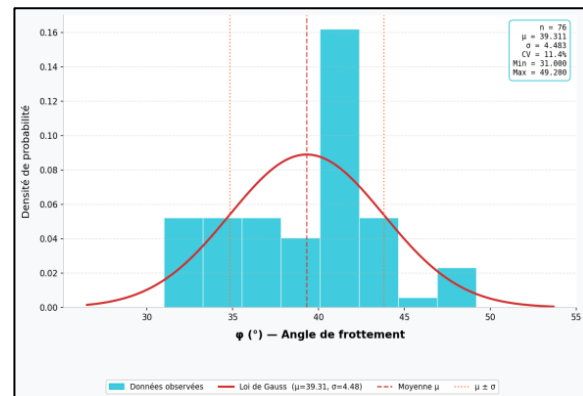


Figure 17: Statistique descriptive de l'angle de frottement interne φ

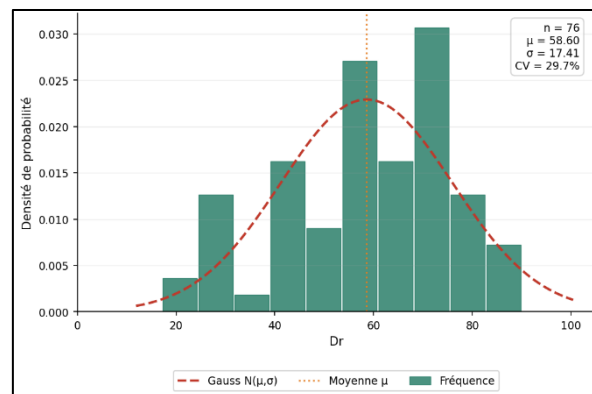


Figure 18: Statistique descriptive de la densité relative D_r

Interprétation

- **Poids volumique γ (N/mm^3):** Variable la plus régulière ($CV < 10\%$). Distribution quasi-symétrique, meilleur ajustement gaussien de toute la base. Les sables testés sont homogènes en densité.
 - **Angle de frottement φ ($^\circ$):** Distribution concentrée autour de 40–44° ($CV = 11.4\%$). Bonne adéquation avec la loi normale. Cohérent avec les valeurs de D_r observées.
 - **Densité relative D_r (%):** Distribution étalée (17–90%, $CV = 29.7\%$). Couvre tous les états de compacité (lâche à dense). Ajustement gaussien acceptable mais légèrement bimodal.
- La figure suivante présente un diagramme circulaire illustrant la répartition des différentes classes de densité du sable utilisées dans cette étude. Cette représentation permet de visualiser la proportion des sols lâches, moyennement denses et denses au sein de base de données analysée. On remarque que la catégorie de sable **moyen** représente la plus grande part avec **44 %**, ce qui montre qu'elle est dominante dans l'ensemble étudié. Les

catégories représentées par 22 % chacune occupe une proportion importante et équilibrée de sable dense et lâche. En revanche, les faibles proportions de 11 % et 1 % indiquent que ces catégories sont peu représentées.

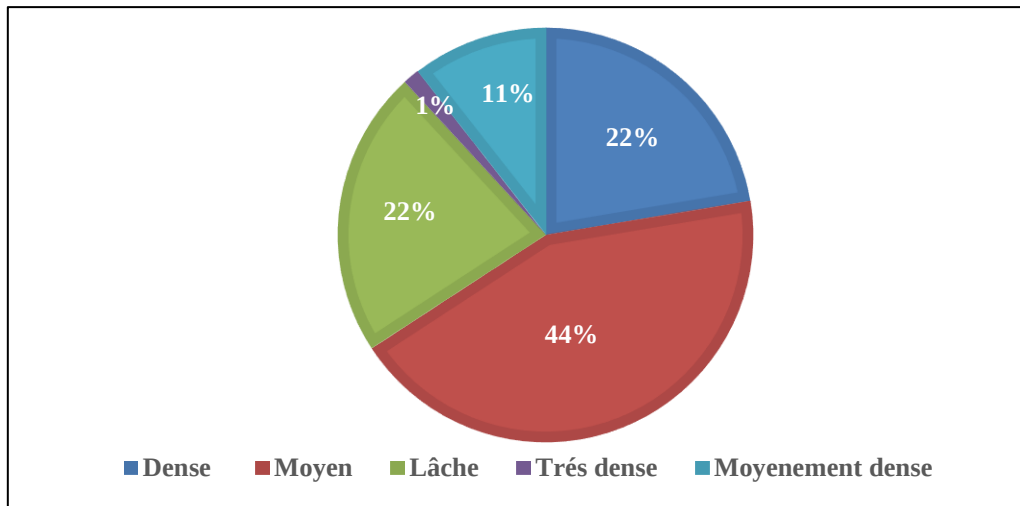


Figure 19: Répartition des sols selon leur densité

II.2.5 Propriétés de la charge et instrumentation

- Les différentes conditions de chargement appliquées aux pieux sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 7: Les propriétés de la charge et instrumentation

Nom du pieu	Point d'application de la charge (mm)	Les jauges de Contrainte	L'inclinomètre	K_i (N/mm)	H_u (N)
D/B=11	175	Oui	Non	185.38	28.00
D/B=27	175	Oui	Non	118.30	38.60
D/B=30	175	Oui	Non	123.17	38.72
25.4_WOS_200	0	Oui	Non	47.86	433.56
25.4_WOS_400	0	Oui	Non	31.96	425.87
25.4_WOS_600	0	Oui	Non	68.14	187.38
25.4_WOS_800	0	Oui	Non	58.34	109.90
L/D=20	0	Non	Non	52.62	1204.11
L/D=25	0	Non	Non	73.28	1023.87
L/D=30	0	Non	Non	112.444	1012.21
1	1234.57	Non	Oui	22.04	86.89
5	1234.57	Non	Oui	50.08	94.57
Test 1	127	Non	Non	688.09	803.93
Test 3	127	Non	Non	670.04	819.96
Test 4	254	Non	Non	307.25	1459.08
Test 6	254	Non	Non	298.19	1503.69
Test 7	254	Non	Non	297.05	1157.88
Test 9	254	Non	Non	310.37	2508.49
Test 10	254	Non	Non	258.04	2037.66
Test 12	254	Non	Non	273.18	2756.43
Horizontal, Dr=30%	75	Oui	Non	39.70	135.72
Horizontal, Dr=45%	75	Oui	Non	60.72	146.19
Horizontal, Dr=70%	75	Oui	Non	71.89	188.36
Free head driven pile	10	Oui	Non	46.75	337.06
Dry (40%)	450	Non	Non	30.86	236.99
Dry (70%)	450	Non	Non	86.38	343.58
Dry (90%)	450	Non	Non	96.22	419.89
Sat (40%)	450	Non	Non	30.16	206.38
Sat (70%)	450	Non	Non	61.91	218.47
73 mm Diameter Circular Pile	170	Oui	Non	220.34	948.59
90 mm Diameter Circular Pile	250	Oui	Non	226.92	993.97
102 mm Diameter Circular Pile	280	Oui	Non	401.36	1676.93

73 mm Square Pile	170	Oui	Non	248.47	1062.08
Pile in sand	75	Non	Non	199.27	3210.53
Horizontal ground	0	Non	Non	30.23	137.01
Horizontal ground	0	Non	Non	31.94	144.68
Horizontal ground	0	Non	Non	27.81	211.84
6D90	0	Non	Oui	672.73	833.91
6L90	0	Non	Oui	11.46	143.49
6M90	0	Non	Oui	16.09	185.86
9L90	0	Non	Oui	20.55	323.47
9M90	0	Non	Oui	31.59	443.14
P1	98	Non	Oui	188.57	4679.84
Pile in loose sand	20	Oui	Non	4.32	7.84
Pile in dense sand	20	Oui	Non	13.70	40.55
2_1	70	Non	Oui	85.94	331.91
2_2	70	Non	Oui	143.44	991.83
2_3	70	Non	Oui	112.94	430.65
2_4	70	Non	Oui	85.12	1206.00
3_1	70	Non	Oui	102.39	1159.70
3_2	70	Non	Oui	71.06	622.76
3_3	70	Non	Oui	55.85	634.41
3_4	70	Non	Oui	70.30	883.40
4_1	80	Non	Oui	147.20	3517.47
5_1	70	Non	Oui	402.18	1998.51
5_3	70	Non	Oui	549.82	1989.60
6_1	70	Non	Oui	40.85	398.20
6_2	70	Non	Oui	49.07	922.20
6_3	70	Non	Oui	31.19	409.74
6_4	70	Non	Oui	43.91	927.89
8_1	70	Non	Oui	97.54	1180.53
8_2	70	Non	Oui	68.13	1219.82
8_3	70	Non	Oui	43.83	442.94
9_4	457	Non	Oui	30.04	309.45
10_1	80	Non	Oui	400.50	8905.20
14_1	686	Non	Oui	26.40	304.02
TS1	0	Oui	Non	84.39	896.98
TC1 (1 cycle)	0	Oui	Non	80.13	824.47
TC2 (1 cycle)	0	Oui	Non	75.48	906.58
D05	49	Oui	Non	32.21	93.06
D08	49	Oui	Non	33.22	95.92
D10	49	Oui	Non	42.93	95.90
P03	49	Oui	Non	27.04	90.11
Id=0.25	150	Non	Non	38.47	1395.71
Id=0.5	150	Non	Non	119.45	1431.06
Id=0.75	150	Non	Non	159.75	3966.64

- Dans le cadre de cette étude, les valeurs de **Ki** et **Hu** ont été obtenues, en utilisant une fonction mathématique définie par : $Y = \frac{X}{a+b \times X}$

Example

Le suivi expérimental du pieu **6L90** est réalisé avec une charge appliquée à une hauteur de **0 mm**. Ce pieu présente une rigidité initiale **Ki = 11.46N/mm** et une charge ultime **Hu = 143.49 N**.

Pour l'acquisition des données, le pieu est instrumenté par un **inclinomètre**, sans toutefois être équipé de **jauges de déformation** permettant la mesure des contraintes internes.

- La figure ci-dessous présente une courbe charge latérale – déplacement horizontal obtenue pour le pieu **6L90** qui montre une augmentation progressive de la charge horizontale avec le déplacement jusqu'à atteindre la capacité portante latérale maximale du pieu. Aucun signe de rupture brutale n'est observé. La courbe met en évidence un comportement non linéaire du système pieu-sol, avec une forte raideur initiale suivie d'une diminution progressive liée à la mobilisation des résistances du sol.

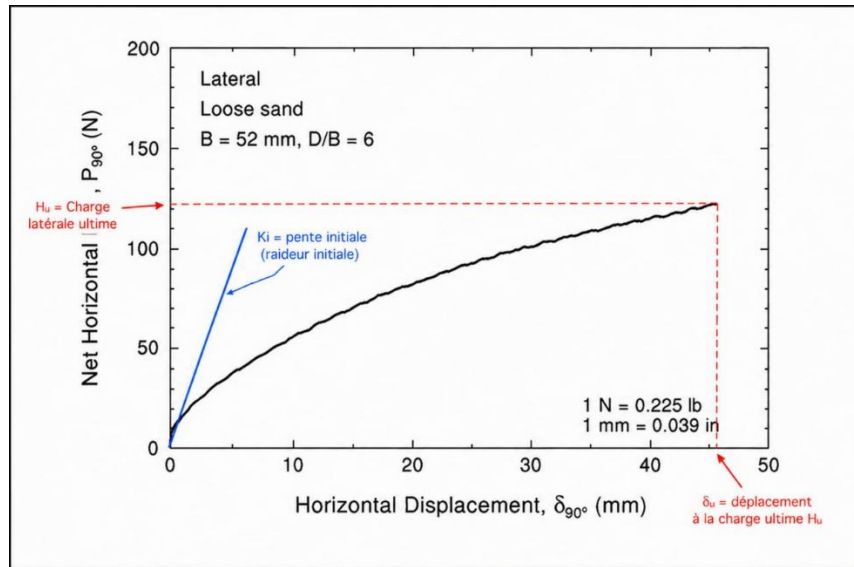


Figure 20: Courbe charge latérale – déplacement horizontal du pieu 6L90 (*Vidic et al., 1992*)

II.3 Analyse statistique

- Le tableau ci-dessous présente une analyse statistique détaillée mettant en regard les valeurs mesurées à travers différents indicateurs de performance selon la catégorie du système.

Tableau 8: Analyse statistique des valeurs mesurées des paramètres latéraux des pieux : H_u et K_i

Catégorie	n	$H_u(N)$		$K_i(N/mm)$			
		μ	σ	$CV(\%)$	μ	σ	$CV(\%)$
Flexible	26	716.2	756.5	105.6%	164.4	177.8	108.2%
Intermédiaire	38	1185	1614	136.2%	138.5	154.3	111.4%
Rigide	12	828.4	1031	124.5%	60.7	45.6	75.1%

- La figure suivante illustre la distribution statistique des paramètres mesurés H_u , K_i pour différentes catégories de pieux (flexibles, intermédiaires et rigides).

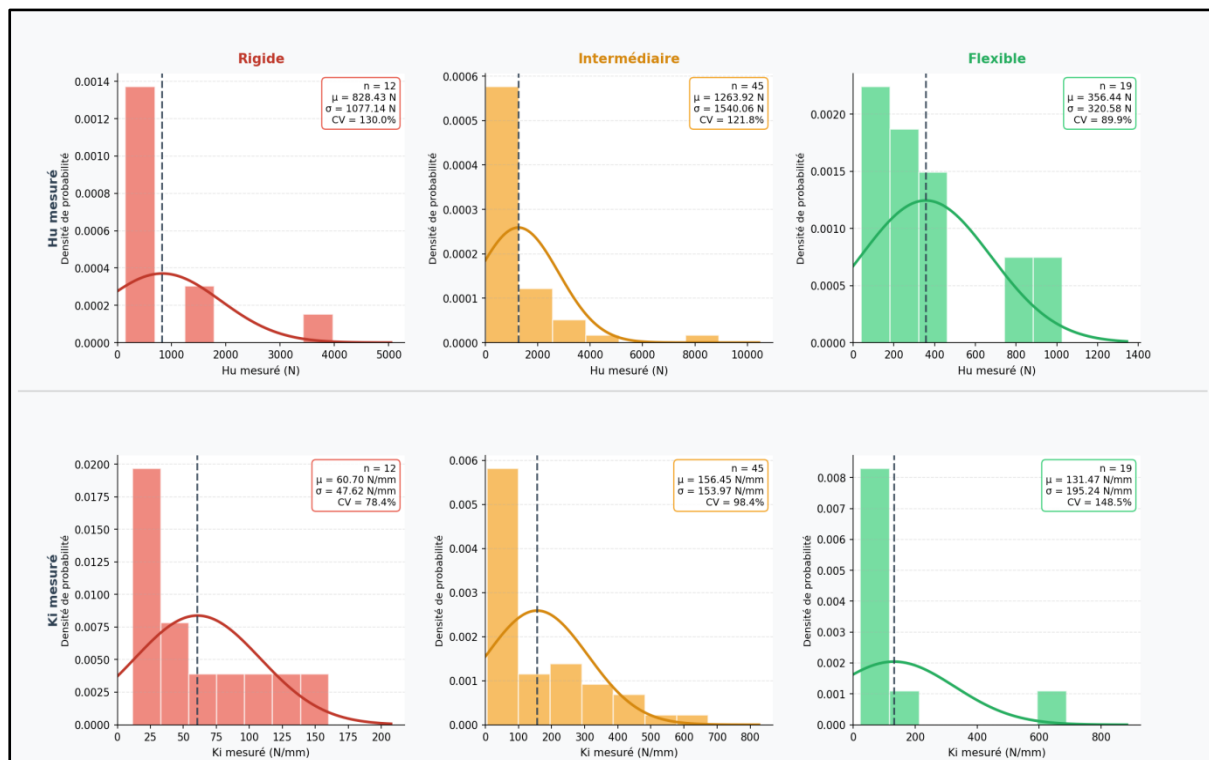


Figure 21: Distribution statistique des paramètres mesurés Hu et Ki selon le type de comportement des pieux : Flexible, Intermédiaire et Rigide

Interprétation

➤ Hu mesuré

♦ Pieux rigides

Les valeurs de Hu sont très dispersées et concentrées dans les faibles intervalles, avec quelques valeurs élevées. Cela traduit une forte variabilité du comportement des pieux rigides.

♦ Pieux intermédiaires

Les pieux intermédiaires présentent les charges ultimes les plus élevées, mais avec une dispersion importante, indiquant une grande hétérogénéité des résultats.

♦ Pieux flexibles

Les valeurs de Hu sont globalement plus faibles et moins dispersées que pour les autres catégories, bien qu'une variabilité notable subsiste.

➤ Ki mesuré

♦ Pieux rigides

La raideur initiale est principalement concentrée à de faibles valeurs, avec une dispersion modérée à élever.

- ♦ **Pieux intermédiaires**

Les pieux intermédiaires présentent les valeurs de raideur les plus élevées, accompagnées d'une variabilité importante.

- ♦ **Pieux flexibles**

La raideur initiale montre une très forte dispersion, révélant un comportement plus hétérogène des pieux flexibles sous chargement latéral.

II.4 Conclusion

Les essais de chargement latéral statique sur pieux isolés ont été réalisés dans plusieurs laboratoires de recherche afin d'étudier expérimentalement leur comportement sous sollicitations horizontales et d'obtenir des résultats fiables et comparables. L'ensemble des essais a été conduit conformément aux normes d'essai en vigueur.

L'analyse repose sur une base de données comprenant soixante-seize pieux à petite échelle (Small scale), de différentes configurations et issus de plusieurs travaux expérimentaux en laboratoire, permettant d'étudier la réponse des pieux ainsi que les mécanismes d'interaction sol-structure sous chargement latéral.

Les expérimentations ont été conduites dans des sols sableux, avec des conditions hydrauliques variables selon les cas étudiés.

Tableau 9: Récapitulatif des données de la littérature et des références bibliographiques des pieux étudiés

Nom du pieu	Référence
De D/B=11 à D/B=30	(Bouafia et al., 1996)
De 25.4_WOS_200 à 25.4_WOS_800	(Muthukkumaran & AR, 2015)
De L/D=20 à L/D=30	(Al-Amery & Al-Dahlaki, 2025)
1 et 5	(김병탁 et al., 1999)
De Test 1 à Test 12	(Little & Briaud, 1988)
D'Horizontal, Dr=30% à Horizontal, Dr=70%	(Begum & Muthukkumaran, 2009)
Free head driven pile	(Gandhi & Selvam, 1997)
De Dry (40%) à Sat (70%)	(백성하 et al., 2017)
De 73 mm Diameter Circular Pile à 102 mm Diameter Circular Pile	(Joo, 1985)
Pile in sand	(Chari & Meyerhof, 1983)
Horizontal ground et Horizontal ground	(Muthukkumaran, 2014)
De 6D90 à 9M90	(Vidic et al., 1992)
P1	(Lin et al., 2015)
Pile in loose sand et Pile in dense sand	(Yuan et al., 2015)
De 2_1 à 14_1	(Agaiby et al., 1991)
De TS1 à TC2 (1 cycle)	(Qin & Guo, 2007)
De D05 à P03	(Tak Kim et al., 2004)
De Id=0.25 à Id=0.75	(Prasad & Chari, 1999)

Chapitre III

Comportement des pieux soumis aux charges latérales et classification selon la rigidité

III.1 Introduction

La rigidité des pieux soumis à des charges latérales constitue un paramètre fondamental en géotechnique, puisqu'elle gouverne leur comportement ainsi que leur interaction avec le sol environnant. Cette rigidité est définie de manière relative, en tenant compte à la fois des caractéristiques du pieu et de celles du sol, ce qui permet de distinguer trois catégories principales : les pieux rigides, les pieux flexibles et les pieux intermédiaires. Cette classification joue un rôle déterminant dans les mécanismes de déformation et dans la distribution des efforts le long du pieu.

Les pieux rigides se caractérisent par de faibles déformations, dominées par un mouvement de rotation, tandis que les pieux flexibles présentent des déformations importantes liées principalement à la flexion. Les pieux intermédiaires représentent un comportement mixte, fortement influencé par les conditions géotechniques du site.

III.2 Méthode de Poulos et Hull (1992)

Selon la méthode de Poulos et Hull, lorsqu'un pieu est soumis en tête à un effort horizontal H et à un moment de flexion M_0 , le déplacement horizontal Y_0 ainsi que la rotation Y_0' à la surface du sol peuvent être exprimés à l'aide de relations faisant intervenir des coefficients d'influence. Ces coefficients dépendent des caractéristiques du sol et de la géométrie du pieu. (BOUAFIA, 2018)

Le déplacement Y_0 et la rotation Y_0' du pieu à la surface du sol sont donnés sous la forme suivante :

$$Y_0 = H \frac{I_{YH}}{E_s(D_e)D_e} + M_0 \frac{I_{YM}}{E_s(D_e)D_e^2}$$

$$Y_0' = H \frac{I_{Y'H}}{E_s(D_e)D_e^2} + M_0 \frac{I_{Y'M}}{E_s(D_e)D_e^3}$$

Le comportement du pieu est classé en fonction de sa rigidité relative :

- Il est considéré flexible lorsque sa longueur D est supérieure à une longueur critique D_c .
- Il est rigide si D est inférieure à $D_c/3$.
- Entre ces deux limites, le pieu est dit intermédiaire ou semi-rigide.

La notion de longueur effective D_e est introduite pour tenir compte de l'interaction sol-structure:

Chapitre III

Comportement des pieux soumis aux charges latérales et classification selon la rigidité

- Pour un pieu flexible, elle correspond à la longueur réelle D .
- Pour un pieu rigide, elle est prise égale à la longueur critique D_c .

Cette longueur critique D_c dépend de la rigidité relative entre le pieu et le sol. Elle permet d'évaluer le déplacement en tête du pieu, qui reste limité au-delà de cette valeur. (BOUAFIA, 2018)

La longueur critique D_c est définie dans tous les cas comme suit :

$$D_c = \begin{cases} 4.44 \left(\frac{E_p I_p}{E_s} \right)^{1/4} & \text{dans un sol homogène} \\ 3.30 \left(\frac{E_p I_p}{m} \right)^{1/5} & \text{dans un sol de Gibson} \end{cases}$$

Tableau 10: Formules des facteurs d'influence selon la méthode de Poulos (sol Gibson $\nu=0.50$) (BOUAFIA, 2018)

	Sol de Gibson $E_s(z) = mz$			
	Pieu flexible		Pieu rigide	
	Tête libre	Tête encastré	Tête libre	Tête encastré
IYH	$13.10 + 11.09 \log_{10} \left(\frac{D_e}{B} \right)$	$5.659 + 4.139 \log_{10} \left(\frac{D_e}{B} \right)$	$3.181 + 9.701 \log_{10} \left(\frac{D}{B} \right)$	$0.773 + 1.081 \log_{10} \left(\frac{D_e}{B} \right)$
$IYM = IY'H$	$34.63 + 18.03 \log_{10} \left(\frac{D_e}{B} \right)$	0	$2.409 + 12.71 \log_{10} \left(\frac{D}{B} \right)$	0
$IY'M$	$156.1 + 37.14 \log_{10} \left(\frac{D_e}{B} \right)$	0	$1.844 + 18.65 \log_{10} \left(\frac{D}{B} \right)$	0

- Le tableau suivant présente les résultats de la détermination du comportement des pieux étudiés selon la méthode de Poulos et Hull (1992). À partir des paramètres mécaniques et géométriques calculés, chaque pieu a été classé comme rigide, intermédiaire ou flexible

Chapitre III

Comportement des pieux soumis aux charges latérales et classification selon la rigidité

Tableau 11: Détermination du comportement des pieux selon Poulos et Hull (1992)

Nom du pieu	K_i (N/mm)	H_u (N)	I_{YH}	I_{YM}	E_s (N/mm ²)	m	D (mm)	D_c (mm)	$D_c/3$	Poulos et Hull (1992)
D/B=11	185.38	28.00	13.21	15.55	38.22	0.25	151.5	182.36	60.79	Intermédiaire
D/B=27	118.30	38.60	17.02	20.54	8.42	0.02	374	295.64	98.55	Flexible
D/B=30	123.17	38.72	17.49	21.16	7.76	0.02	418	307.27	102.42	Flexible
25.4_WOS_200	47.86	433.56	18.66	22.68	1.11	0.00	1000	858.00	286.00	Flexible
25.4_WOS_400	31.96	425.87	17.72	21.45	1.14	0.00	800	816.73	272.24	Intermédiaire
25.4_WOS_600	68.14	187.38	16.50	19.86	4.13	0.01	600	595.63	198.54	Flexible
25.4_WOS_800	58.34	109.90	14.80	17.63	7.30	0.02	400	490.12	163.37	Intermédiaire
L/D=20	52.62	1204.11	15.80	18.95	2.08	0.01	400	420.70	140.23	Intermédiaire
L/D=25	73.28	1023.87	16.74	20.18	2.45	0.00	500	425.55	141.85	Flexible
L/D=30	112.444	1012.21	17.51	21.18	3.28	0.01	600	416.42	138.81	Flexible
1	22.04	86.89	16.74	20.18	7.33	0.02	300	221.66	73.89	Flexible
5	50.08	94.57	16.74	20.18	16.65	0.06	300	188.10	62.70	Flexible
Test 1	688.09	803.93	16.48	19.83	16.58	0.02	812.8	769.23	256.41	Flexible
Test 3	670.04	819.96	16.48	19.83	16.14	0.02	812.8	773.33	257.78	Flexible
Test 4	307.25	1459.08	16.48	19.83	8.57	0.01	812.8	877.66	292.55	Intermédiaire
Test 6	298.19	1503.69	16.48	19.83	8.32	0.01	812.8	882.93	294.31	Intermédiaire
Test 7	297.05	1157.88	16.48	19.83	8.29	0.01	812.8	883.60	294.53	Intermédiaire
Test 9	310.37	2508.49	16.48	19.83	8.66	0.01	812.8	875.89	291.96	Intermédiaire
Test 10	258.04	2037.66	16.48	19.83	7.20	0.01	812.8	908.83	302.94	Intermédiaire
Test 12	273.18	2756.43	16.48	19.83	7.62	0.01	812.8	898.53	299.51	Intermédiaire
Horizontal, Dr=30%	39.70	135.72	16.75	20.19	1.19	0.00	636.5	608.55	202.85	Flexible
Horizontal, Dr=45%	60.72	146.19	17.52	21.20	1.56	0.00	763.8	598.34	199.45	Flexible
Horizontal, Dr=70%	71.89	188.36	18.17	22.05	1.62	0.00	891.1	612.64	204.21	Flexible
Free head driven pile	46.75	337.06	17.14	20.70	1.64	0.00	500	400.10	133.37	Flexible
Dry (40%)	30.86	236.99	17.74	21.48	0.80	0.00	950	892.34	297.45	Flexible
Dry (70%)	86.38	343.58	17.74	21.48	2.23	0.00	950	726.34	242.11	Flexible

Chapitre III

Comportement des pieux soumis aux charges latérales et classification selon la rigidité

Dry (90%)	96.22	419.89	17.74	21.48	2.48	0.00	950	710.84	236.95	Flexible
Sat (40%)	30.16	206.38	17.74	21.48	0.78	0.00	950	896.49	298.83	Flexible
Sat (70%)	61.91	218.47	17.74	21.48	1.60	0.00	950	776.37	258.79	Flexible
73 mm Diameter Circular Pile	220.34	948.59	12.88	15.12	4.95	0.01	730	1495.88	498.63	Intermédiaire
90 mm Diameter Circular Pile	226.92	993.97	12.39	14.47	4.80	0.01	800	1793.18	597.73	Intermédiaire
102 mm Diameter Circular Pile	401.36	1676.93	12.35	14.43	7.51	0.01	900	1813.23	604.41	Intermédiaire
73 mm Square Pile	248.47	1062.08	12.88	15.12	5.58	0.01	730	1595.42	531.81	Intermédiaire
Pile in sand	199.27	3210.53	14.06	16.66	3.08	0.00	991	1855.40	618.47	Intermédiaire
Horizontal ground	30.23	137.01	15.80	18.95	1.18	0.00	500	585.37	195.12	Intermédiaire
Horizontal ground	31.94	144.68	15.80	18.95	1.25	0.00	500	578.95	192.98	Intermédiaire
Horizontal ground	27.81	211.84	15.80	18.95	1.09	0.00	500	595.19	198.40	Intermédiaire
6D90	672.73	833.91	10.73	12.30	23.14	0.07	312	563.46	187.82	Intermédiaire
6L90	11.46	143.49	10.73	12.30	0.39	0.00	312	1272.26	424.09	Rigide
6M90	16.09	185.86	10.73	12.30	0.55	0.00	312	1188.78	396.26	Rigide
9L90	20.55	323.47	12.44	14.54	0.55	0.00	468	1292.63	430.88	Intermédiaire
9M90	31.59	443.14	12.44	14.54	0.84	0.00	468	1186.10	395.37	Intermédiaire
P1	188.57	4679.84	14.20	16.84	2.08	0.00	1394	2611.14	870.38	Intermédiaire
Pile in loose sand	4.32	7.84	16.01	19.21	0.37	0.00	210	407.16	135.72	Intermédiaire
Pile in dense sand	13.70	40.55	16.01	19.21	1.16	0.01	210	323.26	107.75	Intermédiaire
2_1	85.94	331.91	9.02	10.06	3.20	0.01	304.8	1131.24	377.08	Rigide
2_2	143.44	991.83	11.94	13.89	3.19	0.01	609.6	1300.28	433.43	Intermédiaire
2_3	112.94	430.65	9.61	10.83	3.79	0.01	350.52	1124.05	374.68	Rigide
2_4	85.12	1206.00	12.44	14.54	1.73	0.00	685.8	1504.48	501.49	Intermédiaire
3_1	102.39	1159.70	12.44	14.54	2.08	0.00	685.8	1449.90	483.30	Intermédiaire

Chapitre III

Comportement des pieux soumis aux charges latérales et classification selon la rigidité

3_2	71.06	622.76	10.73	12.30	1.96	0.00	457.2	1352.71	450.90	Intermédiaire
3_3	55.85	634.41	10.73	12.30	1.54	0.00	457.2	1419.45	473.15	Rigide
3_4	70.30	883.40	12.25	14.29	1.48	0.00	655.32	1538.29	512.76	Intermédiaire
4_1	147.20	3517.47	10.73	12.30	1.91	0.00	912	2713.56	904.52	Intermédiaire
5_1	402.18	1998.51	10.73	12.30	11.09	0.02	457.2	956.42	318.81	Intermédiaire
5_3	549.82	1989.60	10.73	12.30	15.17	0.03	457.2	898.44	299.48	Intermédiaire
6_1	40.85	398.20	10.73	12.30	1.13	0.00	457.2	1511.07	503.69	Rigide
6_2	49.07	922.20	12.44	14.54	1.00	0.00	685.8	1679.68	559.89	Intermédiaire
6_3	31.19	409.74	10.73	12.30	0.86	0.00	457.2	1594.85	531.62	Rigide
6_4	43.91	927.89	12.44	14.54	0.89	0.00	685.8	1717.39	572.46	Intermédiaire
8_1	97.54	1180.53	12.44	14.54	1.98	0.00	685.8	1464.06	488.02	Intermédiaire
8_2	68.13	1219.82	12.44	14.54	1.38	0.00	685.8	1572.97	524.32	Intermédiaire
8_3	43.83	442.94	12.44	14.54	1.72	0.00	685.8	1505.11	501.70	Intermédiaire
9_4	30.04	309.45	10.73	12.30	1.51	0.00	457.2	1424.69	474.90	Rigide
10_1	400.50	8905.20	12.44	14.54	3.89	0.00	1368	2551.43	850.48	Intermédiaire
14_1	26.40	304.02	10.73	12.30	1.69	0.00	457.2	1394.26	464.75	Rigide
TS1	84.39	896.98	14.76	17.58	3.17	0.01	500	591.26	197.09	Intermédiaire
TC1 (1 cycle)	80.13	824.47	14.76	17.58	3.01	0.01	500	597.41	199.14	Intermédiaire
TC2 (1 cycle)	75.48	906.58	14.76	17.58	2.84	0.01	500	604.60	201.53	Intermédiaire
D05	32.21	93.06	15.24	18.21	2.99	0.01	210	246.35	82.12	Intermédiaire
D08	33.22	95.92	15.24	18.21	3.08	0.01	210	244.83	81.61	Intermédiaire
D10	42.93	95.90	15.24	18.21	3.98	0.02	210	232.59	77.53	Intermédiaire
P03	27.04	90.11	15.24	18.21	2.51	0.01	210	255.12	85.04	Intermédiaire
Id=0.25	38.47	1395.71	10.73	12.30	0.86	0.00	612	2584.26	861.42	Rigide
Id=0.5	119.45	1431.06	10.73	12.30	2.68	0.00	612	2060.29	686.76	Rigide
Id=0.75	159.75	3966.64	10.73	12.30	3.59	0.01	612	1943.91	647.97	Rigide

Chapitre III

Comportement des pieux soumis aux charges latérales et classification selon la rigidité

E_s : Module d'élasticité du sol : $E_s = \frac{K_i}{D^2} \times [(I_{YH} \times D) + (e \times I_{YM})]$

m : Taux d'augmentation linéaire avec la profondeur : $m = \frac{E_s}{D}$

Exemple

Afin d'analyser le comportement d'un pieu sous chargement latéral, on prend l'exemple du pieu **6L90 à tête libre**. L'objectif est de déterminer la nature de son comportement, en évaluant s'il est **Rigide** ou **flexible** ou **intermédiaire** à partir des paramètres géométriques et géotechniques.

➤ Données

$$D = 312 \text{ mm}, \frac{D}{B} = 6, K_i = 11.46 \text{ N.mm}, e = 0 \text{ mm}, EI = 10761784800 \text{ N.mm}^2$$

➤ Calculs :

$$I_{YH} = 3.181 + 9.701 \log_{10} \left(\frac{D}{B} \right) = 3.181 + 9.701 \log_{10}(6) = 10.73$$

$$I_{YM} = 2.409 + 12.71 \log_{10} \left(\frac{D}{B} \right) = 2.409 + 12.71 \log_{10}(6) = 12.30$$

$$E_s = \frac{K_i}{D^2} \times [(I_{YH} \times D) + (e \times I_{YM})] = \frac{11.46}{312^2} \times [(10.73 \times 312) + (0 \times 12.30)] \\ = 0.39 \text{ N/mm}^2$$

$$m = \frac{E_s}{D} = \frac{0.39}{312} = 0.001263 \text{ N.mm}^3$$

$$D_c = 3.30 \times \left(\frac{EI}{m} \right)^{1/5} = 3.30 \times \left(\frac{EI}{m} \right)^{1/5} = 3.30 \times \left(\frac{10761784800}{0.001263} \right)^{1/5} \\ = 1272.26 \text{ mm}$$

➤ On a : $D = 312 \text{ mm} < \frac{D_c}{3} = \frac{1272.26}{3} = 424.09 \text{ mm}$, donc il s'agit d'un pieu **rigide**.

➤ Ce diagramme circulaire présente la répartition des éléments selon leur niveau de rigidité, mettant en évidence une prédominance de la catégorie "Intermédiaire" avec 59%, suivie des catégories "Flexible" à 25% et "Rigide" à 16%.

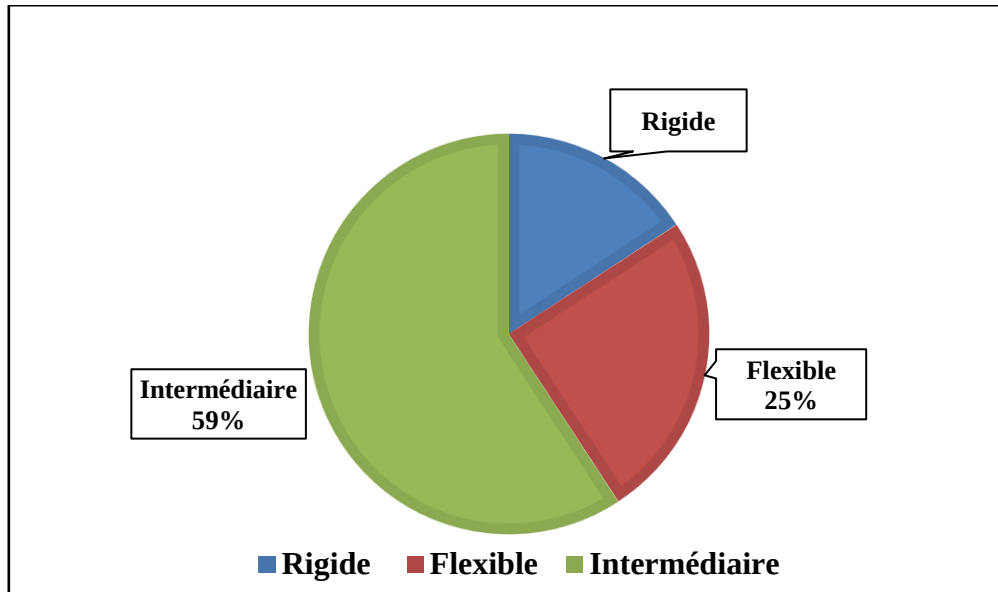


Figure 22: Analyse statistique de la classification des pieux selon leur rigidité

III.3 Conclusion

Ce chapitre a permis d'analyser le comportement des pieux sous chargement latéral en mettant en évidence le rôle essentiel de la rigidité relative sol-pieu. La classification en pieux rigides, flexibles et intermédiaires facilite la compréhension des mécanismes de déformation.

L'application de la méthode de Poulos et Hull a montré l'intérêt des approches analytiques, tout en soulignant leurs limites face à la complexité du comportement réel. Les résultats indiquent une prédominance des comportements intermédiaires et flexibles.

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

IV.1 Introduction

L'intelligence artificielle (IA) constitue un domaine en pleine expansion, marqué par une évolution rapide et un large éventail d'applications pratiques ainsi que de thématiques de recherche. Elle vise à concevoir des systèmes informatiques capables de reproduire certaines formes d'intelligence humaine, notamment la prise de décision, la reconnaissance vocale, ainsi que l'identification de formes et de textures. À l'heure actuelle, l'IA est mobilisée dans divers secteurs tels que la médecine, la finance, la sécurité nationale et la recherche scientifique.(*AOUADJ, s. d.*)

Parmi toutes les techniques qu'on retrouve en intelligence artificielle et en modélisation prédictive, la régression par loi puissance est une approche mathématique à la fois simple et efficace pour décrire les relations non linéaires entre des paramètres géotechniques. L'idée, c'est de poser une relation de type puissance entre les variables étudiées, ce qui permet de représenter le comportement complexe d'un système sol-pieu soumis à un chargement latéral. Dans cette étude, on a développé des modèles de prédiction basés sur la loi puissance pour estimer la réponse latérale des pieux dans le sable, en se servant des principaux paramètres qui influencent le phénomène. Cette méthode donne des équations empiriques qui reproduisent plutôt bien les résultats expérimentaux, avec une précision satisfaisante, tout en restant simples à utiliser dans la pratique courante de l'ingénierie géotechnique.

IV.2 Le modèle de régression linéaire

La régression linéaire, également appelée analyse linéaire de régression, figure parmi les méthodes statistiques les plus employées dans les sciences appliquées. Son principal objectif est, d'une part, d'étudier et de représenter les relations existantes entre une variable dite dépendante ou expliquée et un ensemble de variables indépendantes ou explicatives. D'autre part, cette méthode permet de prévoir les valeurs de la variable expliquée à partir des variables explicatives.(*Foucart, 2006*)

IV.3 Le modèle de régression linéaire multiple

Le modèle de régression linéaire multiple est l'un des outils statistiques les plus couramment utilisés pour analyser des données multidimensionnelles. Il représente un cas particulier des modèles linéaires et constitue une extension naturelle de la régression linéaire

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

simple, permettant d'étudier l'influence simultanée de plusieurs variables explicatives sur une variable dépendante : (Besse, P. C., *communication personnelle, s. d.*)

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^1 + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_p x_i^p + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

- **Modèle mathématique et formules**
- **Forme générale de la régression linéaire multiple**

La forme générale est:

$$Y = C_0 + a_1 B + a_2 D + a_3 e + a_4 \gamma + a_5 \varphi + a_6 Dr + a_7 EI$$

Où:

- Y : la variable prédite (Hu, Ki où $H(Y)$)
- C_0 : constant
- B : diamètre (mm), D : longueur d'encastrement (mm), e : excentricité (mm)
- γ = poids volumique ($N.mm^3$), φ : angle de frottement ($^\circ$)
- Dr : densité relative (%), EI : rigidité ($N.mm^2$)
- $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$: coefficients de régression

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

Tableau 12: Coefficients de régression des modèles prédictifs de H_u selon la rigidité des pieux

Cible	Rigidité	C_0	$a_1(B)$	$a_2(D)$	$a_3(e)$	$a_4(\gamma)$	$a_5(\varphi)$	$a_6(Dr)$	$a_7(EI)$	R^2
H_u	Flexible	3.3052E+2	0.3593	0.01237	-0.02924	0.5319	0.229	0.1494	4.235E-09	0.1000
H_u	Intermédiaire	-1.650E+3	9.92	0.8764	-3.729	3.32E+1	1.338E+1	8.82	6.06E-09	0.0997
H_u	Rigide	-3.1211E+4	1.012E+2	1.768E+1	-4.915E+1	4.84E+2	2.005E+2	1.509E+2	5.908E-08	0.1002

Exemple de calcul de H_u : (Le pieu rigide 6L90)

$$H_u = 3.1211 \times 10^4 + 1.012 \times 10^2 B + 17.68 D + (-49.15)e + 4.84 \times 10^2 \gamma + 2.005 \times 10^2 \varphi + 1.509 \times 10^2 Dr + 5.908 \times 10^{-8} EI$$

$$H_u = 3.1211 \times 10^4 + 1.012 \times 10^2 \times 52 + 17.68 \times 312 + (-49.15) + 4.84 \times 10^2 \times 1.5 \times 10^{-5} + 2.005 \times 10^2 \times 35.6 + 1.509 \times 10^2 \times 17.1 + 5.908 \times 10^{-8} \times 1.076 \times 10^{10}$$

$$H_u \text{ calculé} = 52294.31 \text{ N}$$

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

$Hu_{\text{mesuré}} = 143.5 \text{ N}$

Tableau 13: Coefficients de régression des modèles prédictifs de K_i selon la rigidité des pieux

Cible	Rigidité	C_0	$a_1(B)$	$a_2(D)$	$a_3(e)$	$a_4(\gamma)$	$a_5(\varphi)$	$a_6(Dr)$	$a_7(EI)$	R^2
K_i	Flexible	-1.6645E+2	2.141	0.0737	-0.1742	3.169	1.364	0.8899	2.523E-08	0.1003
K_i	Intermédiaire	1.299E+2	0.1402	0.01239	-0.05271	0.4693	0.1891	0.1247	8.565E-11	0.0255
K_i	Rigide	-1.5365E+3	6.126	1.07	-2.974	2.929E+1	1.213E+1	9.134	3.576E-09	0.0998

 Exemple de calcul de K_i : (Le pieu rigide 6L90)

$$K_i = -1.5365 \times 10^3 + 6.126B + 1.07D + (-2.974)e + 29.29 \times \gamma + 12.13\varphi + 9.134Dr + 3.576 \times 10^{-9}EI$$

$$K_i = -1.5365 \times 10^3 + 6.126 \times 52 + 1.07 \times 312 + (-2.974) + 29.29 \times 1.5 \times 10^{-5} + 12.13 \times 35.6 + 9.134 \times 17.1 + 3.576 \times 10^{-9} \times 1.076 \times 10^{10}$$

$K_i \text{ calculé} \approx -260.58 \text{ N/mm}$ (Valeur illogique)

$K_i \text{ mesuré} = 11.46 \text{ N/mm}$

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

Tableau 14: Coefficients de régression des modèles prédictifs de $H(10\%B)$ selon la rigidité des pieux

Cible	Rigidité	C_0	$a_1(B)$	$a_2(D)$	$a_3(e)$	$a_4(\gamma)$	$a_5(\varphi)$	$a_6(Dr)$	$a_7(EI)$	R^2
$H(10\%B)$	Flexible	-2.5562E+2	3.492	0.1202	-0.2842	5.169	2.225	1.451	4.115E-08	0.1001
$H(10\%B)$	Intermédiaire	4.2667E+2	0.3806	0.03363	-0.1431	1.274	0.5132	0.3384	2.325E-10	0.1000
$H(10\%B)$	Rigide	2.398E+3	1.285	0.2245	-0.624	6.145	2.545	1.916	7.501E-10	0.0996

🔗 Exemple de calcul de $H(Y10\%B)(N)$: (Le pieu rigide 6L90)

$$H(10\%B) = -1.5365 \times 10^3 + 6.126B + 1.07D + (-2.974)e + 29.29 \times \gamma + 12.13\varphi + 9.134Dr + 3.576 \times 10^{\wedge} - 9EI$$

$$H(10\%B) = -1.5365 \times 10^3 + 6.126 \times 52 + 1.07 \times 312 + (-2.974) + 29.29 \times 1.5 \times 10^{-5} + 12.13 \times 17.1 + 9.134 \times 35.6 + 3.576 \times 10^{\wedge} - 9 \times 1.076 \times 10^{\wedge}10$$

$H(10\%B)$ calculé = -316.01N (Valeur illogique)

$H(10\%B)$ mesuré = 35.53 N

IV.4 Analyse statistique

- Le tableau ci-dessous présente une analyse statistique détaillée mettant en regard les valeurs calculées à travers différents indicateurs de performance selon la catégorie du système :

Tableau 15: Analyse statistique des valeurs calculées des paramètres latéraux des pieux : *Hu, Ki et H(10%B)*

		<i>Hu(N)</i>			<i>Ki(N/mm)</i>			<i>H(10%B)(N)</i>		
Catégorie	n	μ	σ	CV (%)	μ	σ	CV (%)	μ	σ	CV (%)
Flexible	19	373.7	27.3	7.3%	90.7	162.6	179.3%	163.8	265.3	162.0%
Intermédiaire	45	1018.2	1733.1	170.2%	167.6	24.5	14.6%	529.0	66.5	12.6%
Rigide	12	8574.0	16296.5	190.1%	871.4	986.3	113.2%	2903.1	206.9	7.1%

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

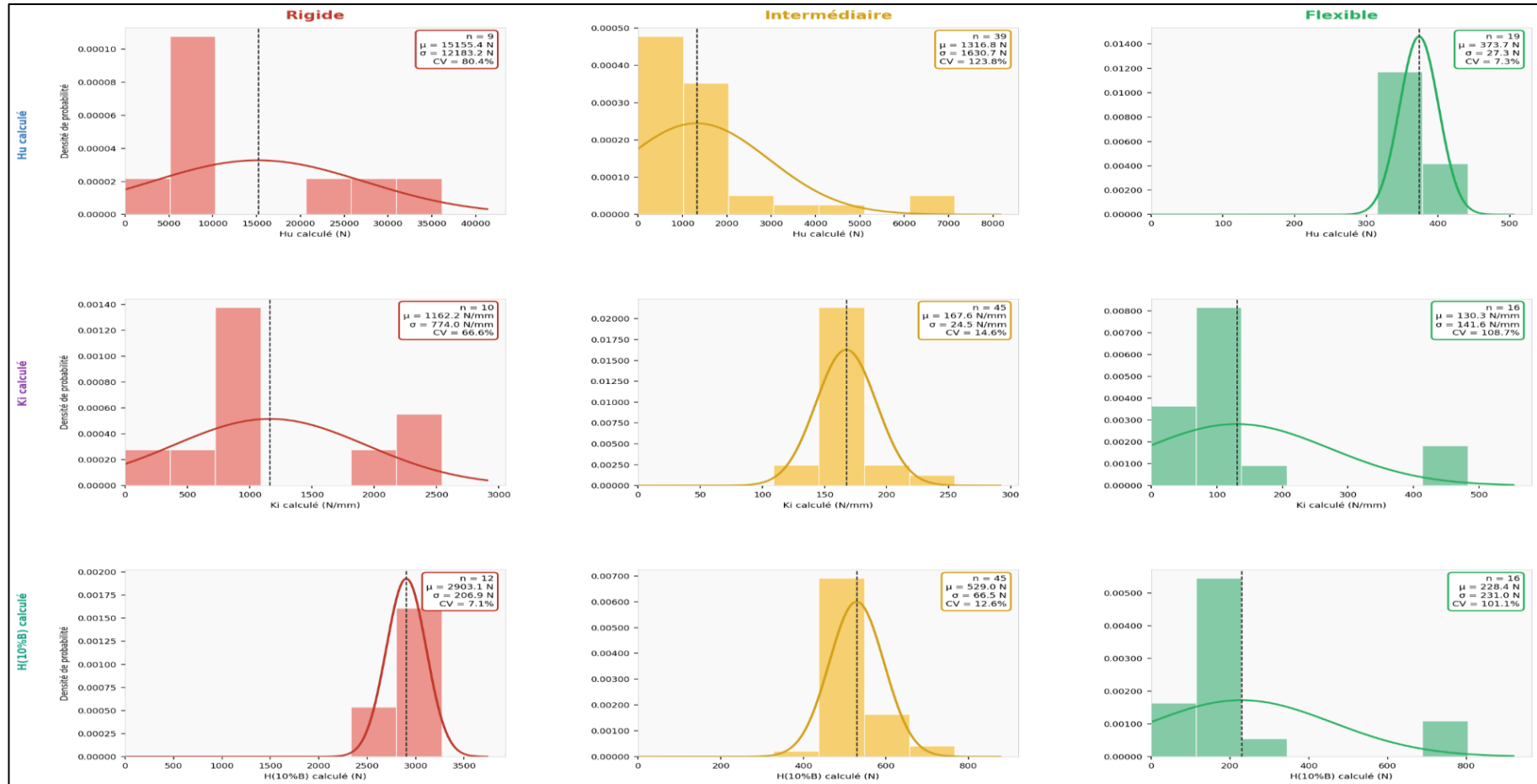


Figure 23: Distribution statistique des paramètres calculés Hu , Ki , $H(10\%B)$ selon le type de comportement des pieux : Flexible, Intermédiaire et rigide.

Interprétation

➤ ***Hu* Calculé**

♦ **Pieux rigides**

Distribution très étalée ($\sigma = 16\,297\text{ N}$, $CV = 190.1\%$), fortement asymétrique vers la droite. La courbe de Gauss ne représente pas bien la réalité, la majorité des pieux se concentre près de 0 alors que quelques cas extrêmes tirent la moyenne à $8\,574\text{ N}$. La formule est très instable pour cette catégorie.

♦ **Pieux intermédiaires**

Distribution large ($\sigma = 1\,733\text{ N}$, $CV = 170.2\%$) avec une forte concentration près de zéro et une longue queue droite. La gaussienne est très aplatie, signe que les pieux intermédiaires ont des comportements très hétérogènes vis-à-vis de *Hu*.

➤ **Pieux flexibles**

Distribution étroite et bien centrée ($\sigma = 27.3\text{ N}$, $CV = 7.3\%$). La courbe de Gauss s'ajuste correctement à l'histogramme.

➤ ***Ki* Calculé**

♦ **Pieux rigides**

Dispersion modérée à forte ($\sigma = 986.3\text{ N/mm}$, $CV = 113.2\%$) avec une concentration dans les premières classes et une queue droite étendue. Quelques pieux rigides présentent des raideurs très élevées qui déforment la distribution.

♦ **Pieux intermédiaires**

Distribution très resserrée et bien centrée ($\sigma = 24.5\text{ N/mm}$, $CV = 14.6\%$), la meilleure adéquation de toute l'analyse. La gaussienne s'ajuste bien à l'histogramme.

♦ **Pieux flexibles**

Distribution très dispersée ($\sigma = 162.6\text{ N/mm}$, $CV = 179.3\%$) avec des valeurs négatives exclues. La majorité des pieux se regroupe près de zéro, ce qui indique que la formule de *Ki* n'est pas adaptée à cette catégorie.

➤ ***H(10%B)* Calculé**

♦ **Pieux rigides**

Distribution relativement concentrée autour de $\mu = 2\,903.1\text{ N}$ ($\sigma = 206.9\text{ N}$, $CV = 7.1\%$) sur 12

pieux. La gaussienne s'ajuste bien, c'est le deuxième meilleur cas de l'analyse après Ki intermédiaire.

♦ **Pieux intermédiaires**

Dispersion élevée ($\sigma = 66.5$ N, CV = 12.6%) mais avec une distribution plutôt groupée autour de la moyenne. La gaussienne représente correctement la forme générale, bien que quelques valeurs s'écartent vers la droite.

♦ **Pieux flexibles**

Distribution très étalée ($\sigma = 265.3$ N, CV = 162%). La courbe gaussienne est très aplatie et la dispersion importante indique que la formule $H(10\%B)$ prédit mal pour les pieux flexibles, similairement à Ki pour cette même catégorie.

IV.5 Évaluation de la formule proposée en régression multiple pour la prédiction de la charge latérale ultime Hu , de la raideur initiale Ki et de la charge $H(10\%B)$

- Le tableau ci-dessous montre les coefficients R^2 qu'on a obtenus avec la formule proposée basée sur la régression multiple pour estimer la charge latérale ultime Hu , la raideur initiale Ki et de la charge $H(10\%B)$ selon que les pieux se comportent de manière flexible, intermédiaire ou rigide. Le R^2 , c'est un indicateur de la qualité de l'ajustement : plus il se rapproche de 1, plus la corrélation est bonne.

Tableau 16: Synthèse des coefficients de détermination R^2 de Hu , Ki et $H(10\%B)$

	Flexible (n=19)	Intermédiaire (n=45)	Rigide (n=12)
Hu	0.1000	0.0997	0.1002
Ki (N/mm)	0.1003	0.0255	0.0998
$H(10\%B)$	0.1001	0.1000	0.0996

Interprétation

- ♦ **Pour la charge ultime Hu** : les R^2 sont quasi-identiques pour les trois groupes (~ 0.10), indiquant un ajustement globalement faible et uniforme, quel que soit le type de pieu. Ces valeurs très basses

traduisent une **inadéquation manifeste** du modèle à reproduire la charge ultime, suggérant que les variables explicatives retenues ne capturent pas les mécanismes réels gouvernant ce paramètre.

- ♦ **Pour la raideur initiale K_i** : c'est la variable la plus problématique. Les pieux flexibles et rigides affichent un $R^2 \sim 0.10$, déjà faible, mais les pieux intermédiaires enregistrent le **R^2 le plus bas du tableau (0.0255)**. Le modèle peine particulièrement à reproduire la raideur initiale de ce groupe de transition, révélant une **défaillance structurelle** de la formule pour ce type de pieu dont le comportement est plus complexe et hétérogène.
- ♦ **Pour la charge $H(10\%B)$** : les R^2 sont homogènes entre les trois groupes (~ 0.10), confirmant une limite systématique et généralisée du modèle. Cette uniformité dans la faiblesse des ajustements indique que le modèle est **incapable de discriminer** le comportement des différents types de pieux pour cette variable.

IV.6 Le modèle de régression puissance

Le modèle de régression puissance est une méthode statistique utilisée pour représenter la relation entre deux variables lorsque l'une évolue suivant une puissance de l'autre. Ce type de modèle est souvent employé pour analyser et ajuster des données expérimentales afin d'évaluer le degré de corrélation entre les paramètres étudiés.

$$y = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_p^{\beta_p} \quad (\text{Verdoolaege, 2015})$$

- **Modèle mathématique et formules**
- **Forme générale de la loi puissance**

Le modèle de régression adopté est une loi puissance multivariable, linéarisée par transformation logarithmique.

La forme générale est:

$$Y = \alpha \times B^a \times D^b \times e^c \times EI^d \times \gamma^f \times \varphi^g \times Dr^h$$

Où:

- Y : la variable prédite (H_u, K_i ou $H(Y)$)
- B : diamètre (mm), D : longueur d'encastrement (mm), e : excentricité (mm)
- EI : rigidité ($N \cdot mm^2$), γ = poids volumique ($N \cdot mm^3$)
- φ : angle de frottement ($^\circ$), Dr : densité relative (%)
- $\alpha, a, b, c, d, e, f, g, h$: coefficients de régression

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

- Les coefficients $\alpha, a, b, c, d, e, f, g, h$; sont déterminés par régression linéaire ordinaire sur les données log-transformées sont présentés dans les tableaux suivant

Tableau 17: Coefficients de régression des modèles prédictifs de ***Hu*** selon la rigidité des pieux

Cible	Rigidité	α	$a(B)$	$b(D)$	$c(e)$	$d(EI)$	$f(\gamma)$	$g(\varphi)$	$h(Dr)$	R^2
<i>Hu</i>	Flexible	5.455E-22	-3.5009	0.8430	-0.2106	0.7121	-1.8054	9.9283	-2.3206	0.6376
<i>Hu</i>	Intermédiaire	4.409E-03	1.8538	1.9286	-0.0426	-0.4006	0.8344	2.5826	0.4224	0.8117
<i>Hu</i>	Rigide	2.711E+18	23.2269	2.8535	-0.3596	-3.1110	7.0220	0.5551	-0.1164	0.9031

 Exemple de calcul de *Hu* : (Le pieu rigide 6L90)

$$Hu = 2.7105 \times 10^{18} \times B^{23.2269} \times D^{2.8535} \times e^{-0.3596} \times EI^{d-3.1110} \times \gamma^{7.0220} \times \varphi^{g0.5551} \times Dr^{h-0.1164}$$

$$Hu = 2.7105 \times 10^{18} \times 52^{23.227} \times 312^{2.853} \times 1^{-0.360} \times (1.076 \times 10^{10})^{-3.111} \times (1.5 \times 10^{-5})^{7.022} \times 35.6^{0.555} \times 17.1^{-0.116}$$

***Hu calculé* = 132.3 N**

***Hu mesuré* = 143.5 N**

Tableau 18: Coefficients de régression des modèles prédictifs de Ki selon la rigidité des pieux

Cible	Rigidité	α	$a(B)$	$b(D)$	$c(e)$	$d(EI)$	$f(\gamma)$	$g(\varphi)$	$h(Dr)$	R^2
Ki	Flexible	1.723E+05	-2.3058	-0.3712	-0.0562	0.7163	1.4765	0.2451	0.7682	0.7197
Ki	Intermédiaire	9.540E+14	-1.5931	-0.2064	0.0445	0.5231	4.6153	4.5310	-0.0921	0.5387
Ki	Rigide	1.078E-04	30.0749	-0.4311	-0.4008	-3.7065	3.3416	4.3716	-0.1956	0.9419

 Exemple de calcul de Ki : (Le pieu rigide 6L90)

$$Ki = 1.0779 \times 10^{-4} \times B^{30.075} \times D^{b-0.431} \times e^{-0.401} \times EI^{-3.707} \times \gamma^{3.342} \times \varphi^{4.372} \times Dr^{-0.196}$$

$$Ki = 1.0779 \times 10^{-4} \times 52^{30.075} \times 312^{-0.431} \times 1^{-0.401} \times (1.076 \times 10^{10})^{-3.707} \times (1.5 \times 10^{-5})^{3.342} \times 35.6^{4.372} \times 17.1^{-0.196}$$

Ki calculé ≈ 10.16 N/mm

Ki mesuré = 11.46 N/mm

Tableau 19: Coefficients de régression des modèles prédictifs de $H(10\%B)$ selon la rigidité des pieux

Cible	Rigidité	α	$a(B)$	$b(D)$	$c(e)$	$d(EI)$	$f(\gamma)$	$g(\varphi)$	$h(Dr)$	R^2
$H(10\%B)$	Flexible	6,391E-21	-1,9039	-0,7079	-0,0448	0,5827	-2,6115	6,6189	-0,6217	0,8850
$H(10\%B)$	Intermédiaire	6,711E+00	-0,5634	1,4013	0,0184	0,2118	2,8491	6,5075	-0,1293	0,5919
$H(10\%B)$	Rigide	4,402E-03	24,1492	0,7978	-0,3296	-2,8521	3,6785	3,9198	-0,2310	0,9896

 Exemple de calcul de $H(10\%B)(N)$: (Le pieu rigide 6L90)

$$H(Y) = 4.4025 \times 10^{-3} \times B^{24.149} \times D^{0.798} \times e^{-0.330} \times EI^{-2.852} \times \gamma^{3.679} \times \varphi^{3.920} \times Dr^{-0.231}$$

$$H(Y) = 4.4025 \times 10^{-3} \times 52^{24.149} \times 312^{0.798} \times 1^{-0.330} \times (1.076 \times 10^{10})^{-2.852} \times (1.5 \times 10^{-5})^{3.679} \times 35.6^{3.920} \times 17.1^{-0.231}$$

$$H(Y) \text{ calculé} = 35.53 \text{ N}$$

$$H(Y) \text{ mesuré} = 35.53 \text{ N}$$

$$H(Y) = H(10\%B) = \frac{Y}{(1/Ki)+(Y/Hu)} \text{ avec : } Y = 10\%B$$

IV.7 Analyse statistique

- Le tableau ci-dessous présente une analyse statistique détaillée mettant en regard les valeurs calculées et mesurées à travers différents indicateurs de performance selon la catégorie du système.

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

Tableau 20: Analyse statistique des valeurs calculées paramètres latéraux des pieux : Hu , Ki et $H(10\%B)$

		$Hu(N)$			$Ki(N/mm)$			$H(10\%B)(N)$		
Catégorie	n	μ	σ	CV (%)	μ	σ	CV (%)	μ	σ	CV (%)
Flexible	19	373.7	473.4	126.7%	90.7	99.2	109.4%	163.8	182.2	111.2%
Intermédiaire	45	1018.2	1053.3	103.4%	167.6	153.5	91.6%	529.0	523.7	99.0%
Rigide	12	8579.2	10123.1	118.0%	871.5	722.2	82.9%	2903.1	3190.4	109.9%

- La figure suivante illustre la distribution statistique des paramètres calculés Hu , Ki et $H(Y)$ pour différentes catégories de pieux (flexibles, intermédiaires et rigides).

Chapitre IV

Développement de modèles de prédiction en loi puissance pour la réponse latérale des pieux en sable

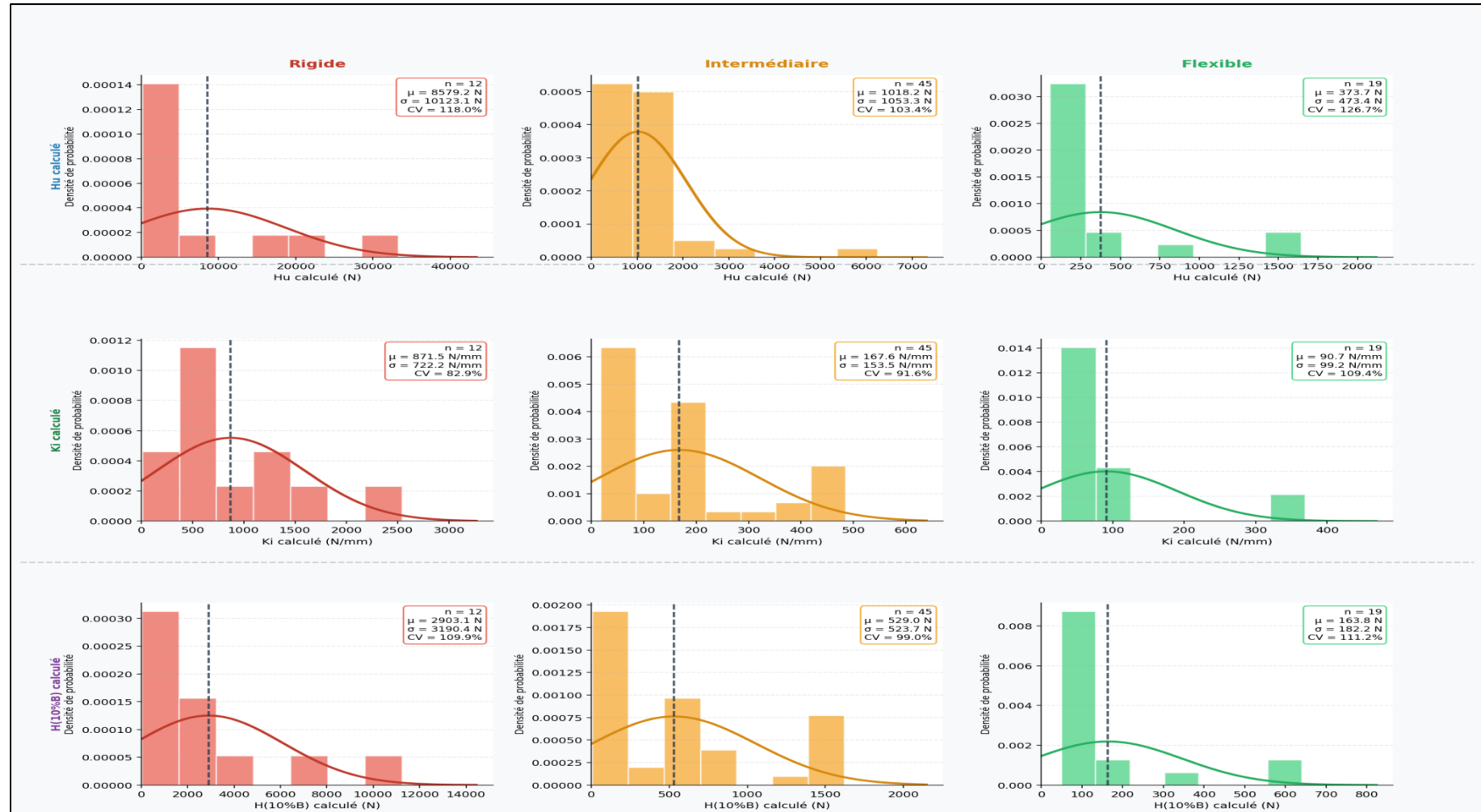


Figure 24: Distribution statistique des paramètres calculés H_u , K_i , $H(10\%B)$ selon le type de comportement des pieux : Flexible, Intermédiaire et rigide.

Interprétation

➤ ***Hu* Calculé**

♦ **Pieux rigides**

L'histogramme montre une forte dispersion des valeurs de H_u , avec une moyenne de 8579,2 N et un coefficient de variation de 118 %. Cela indique que la capacité portante latérale des pieux rigides varie considérablement d'un essai à l'autre, en raison des différences de dimensions des pieux et des conditions du sol.

♦ **Pieux intermédiaires**

Les valeurs de H_u sont principalement concentrées autour de faibles charges, avec une moyenne de 1018,2 N. La distribution est asymétrique vers la droite, ce qui révèle la présence de quelques valeurs élevées. Le coefficient de variation de 103,4 % traduit une variabilité importante.

♦ **Pieux flexibles**

Les valeurs de H_u sont globalement faibles, avec une moyenne de 373,7 N. La dispersion reste élevée ($CV = 126,7 \%$), ce qui montre une forte influence des paramètres géotechniques et géométriques sur la résistance latérale des pieux flexibles.

➤ ***Ki* Calculé**

♦ **Pieux rigides**

La raideur initiale présente une moyenne élevée de 871,5 N/mm. Les valeurs sont réparties sur une large plage, indiquant que les pieux rigides offrent généralement une forte résistance aux déplacements latéraux, malgré une variabilité notable ($CV = 82,9 \%$).

♦ **Pieux intermédiaires**

La moyenne est de 167,6 N/mm. La majorité des valeurs est regroupée dans les faibles intervalles, tandis que quelques valeurs plus élevées augmentent la dispersion des résultats ($CV = 91 \%$).

♦ **Pieux flexibles**

Les pieux flexibles présentent la plus faible raideur moyenne (90,7 N/mm). Cela

traduit une plus grande déformabilité sous chargement latéral. Le coefficient de variation de 109,4 % confirme l'hétérogénéité des résultats.

➤ **$H(10\%B)$ Calculé**

♦ **Pieux rigides**

Les valeurs de sont les plus élevées parmi les trois catégories, avec une moyenne de 2903,1 N. La forte dispersion (CV = 109,9 %) montre que la résistance au déplacement limite varie fortement selon les essais.

♦ **Pieux intermédiaires**

La moyenne est de 529 N. Les résultats sont concentrés dans les faibles valeurs mais restent dispersés, comme l'indique le coefficient de variation de 99 %.

♦ **Pieux flexibles**

Les valeurs de sont les plus faibles, avec une moyenne de 163,8 N. Cela confirme que les pieux flexibles atteignent plus rapidement le critère de déplacement limite sous chargement latéral. La dispersion reste importante (CV = 111,2 %).

IV.8 Confrontation entre les valeurs expérimentales et les prédictions théoriques basée sur la régression en loi puissance

- Cette figure illustre la corrélation entre les valeurs mesurées et calculées de la charge ultime latérale H_u pour les différentes catégories de pieux étudiées, à travers des nuages des points.

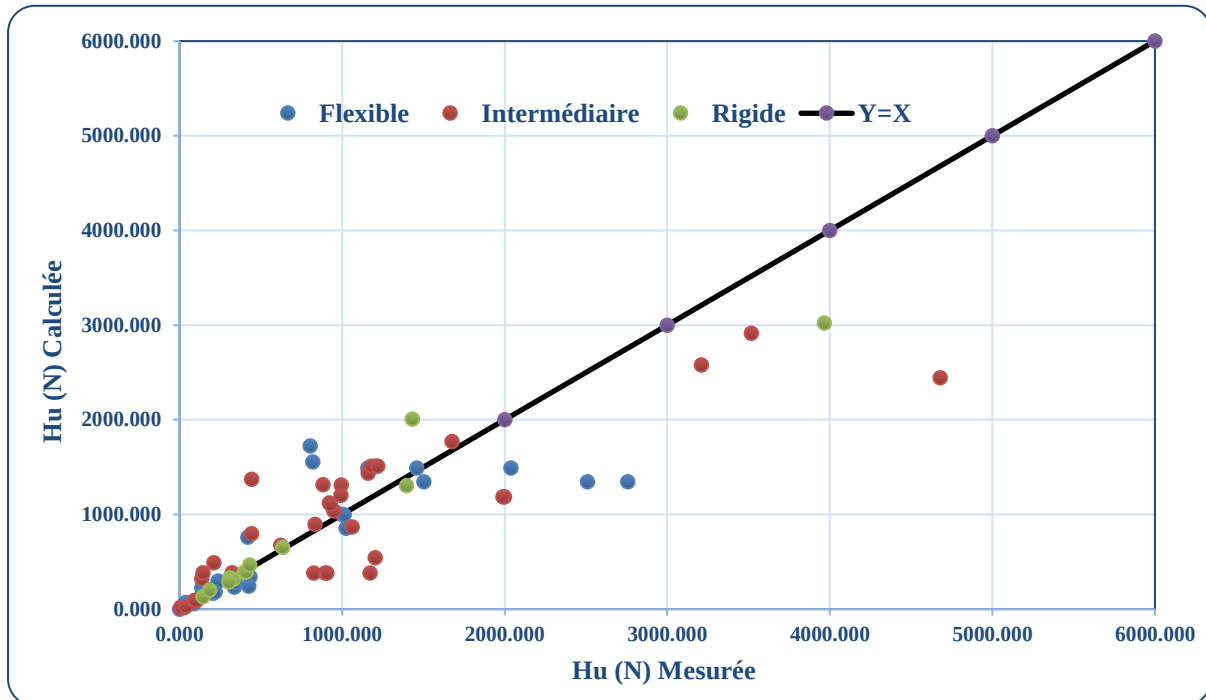


Figure 25: dispersion des valeurs de H_u (N) calculées en fonction des valeurs mesurées

Interprétation

- ◆ **Pieux Rigides :** $R^2 = 0.903$ le nuage de points de H_u présente un très bon alignement autour de la droite idéale. Cela montre que les valeurs calculées sont très proches des valeurs expérimentales, ce qui confirme l'efficacité du modèle pour la prédiction de la charge ultime. La faible dispersion des points traduit également une bonne cohérence entre les résultats théoriques et expérimentaux.
- ◆ **Pieux Intermédiaires :** $R^2 = 0.812$ le nuage de points est plus dispersé. Certains résultats montrent des écarts relativement importants entre les valeurs calculées et mesurées, notamment pour les fortes charges. Cette dispersion peut être liée à la transition

mécanique propre aux pieux intermédiaires, qui rend leur comportement plus difficile à modéliser. Malgré cela, la tendance générale du nuage reste acceptable et montre que le modèle conserve une bonne capacité de prédiction.

- ♦ **Pieux Flexibles** : $R^2 = 0.638$ le nuage de points présente la dispersion la plus importante parmi les différentes catégories de pieux. Les écarts augmentent surtout pour les grandes valeurs de charge ultime, ce qui indique que le modèle devient moins précis dans les situations extrêmes. Cette variabilité est principalement due à l'influence des déformations importantes et à la sensibilité des pieux flexibles aux paramètres géotechniques. Cependant, le modèle reste capable de représenter l'évolution générale des résultats.
- Cette figure illustre la corrélation entre les valeurs mesurées et calculées de la raideur initiale K_i pour les différentes catégories de pieux étudiées, à travers des nuages des points.

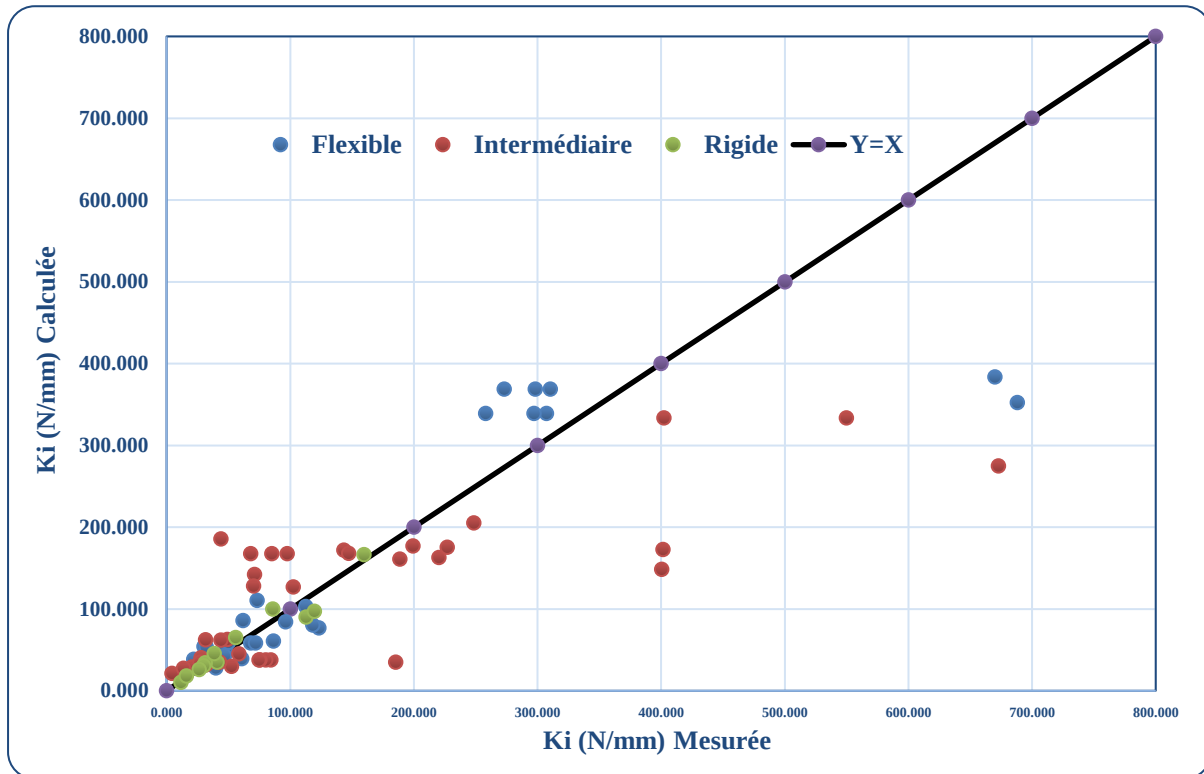


Figure 26: dispersion des valeurs de Ki (N/mm) calculées en fonction des valeurs mesurées

Interprétation

- ◆ **Pieux Rigides** $R^2 = 0.942$ le nuage de points montre que la majorité des valeurs calculées sont proches des valeurs expérimentales. Les points sont relativement alignés autour de la droite idéale, ce qui indique que le modèle utilisé permet de bien représenter la raideur initiale des pieux rigides. La faible dispersion observée traduit également une bonne stabilité du comportement mécanique de cette catégorie de pieux. Quelques écarts restent visibles, mais ils peuvent être expliqués par les variations des caractéristiques géotechniques du sable ou par certaines conditions expérimentales.
- ◆ **Pieux Intermédiaires** $R^2 = 0.539$ le nuage de points présente une dispersion plus importante par rapport aux pieux rigides. Cela montre que le modèle prédit les valeurs de Ki avec une précision moyenne. Cette variabilité peut être liée au fait que les pieux intermédiaires représentent une zone de transition entre le comportement rigide et flexible, ce qui rend leur réponse mécanique plus complexe. Malgré cela, les points suivent globalement une tendance croissante, ce qui confirme que le modèle reste acceptable pour cette catégorie.

- ♦ **Pieux Flexibles** $R^2 = 0.720$ Le nuage montre une corrélation acceptable, avec la majorité des points proches de la bissectrice. Quelques points en zone de forte raideur s'écartent significativement, indiquant que le modèle sous-estime K_i pour les cas extrêmes, probablement en raison de l'influence des conditions aux limites expérimentales non prises en compte.
- Cette figure illustre la corrélation entre les valeurs mesurées et calculées de la charge $H(10\%B)$ pour les différentes catégories de pieux étudiées, à travers des nuages des points.

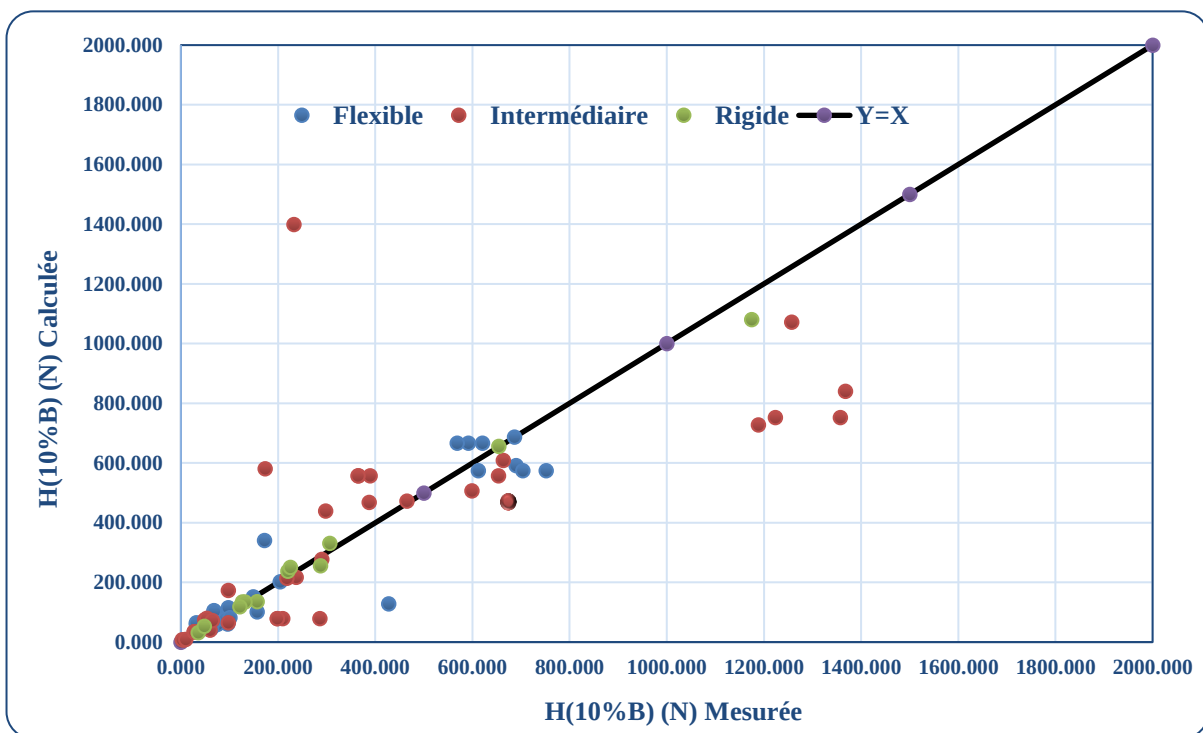


Figure 27: dispersion des valeurs de $H(10\%B)(N)$ calculées en fonction des valeurs mesurées

Interprétation

- ♦ **Pieux Rigides** $R^2 = 0.990$ Le nuage est remarquablement aligné sur la bissectrice, avec une dispersion quasi nulle. Avec $R^2 = 0.990$, le modèle reproduit avec une précision exceptionnelle la charge $H(10\%B)$ des pieux rigides. Ce résultat confirme que la loi
- ♦

puissance est parfaitement adaptée à cette catégorie, dont la réponse latérale est déterministe et bien gouvernée par les variables géométriques et géotechniques retenues.

- ◆ **Pieux Intermédiaires** $R^2 = 0.592$ le nuage de points présente une dispersion relativement importante. Certains points sont éloignés de la droite parfaite, ce qui indique que le modèle peut parfois sous-estimer ou surestimer les valeurs expérimentales. Cette dispersion est principalement liée à la complexité du comportement des pieux intermédiaires. Malgré ces écarts, la tendance générale reste satisfaisante puisque les points demeurent globalement répartis autour de la bissectrice.
- ◆ **Pieux Flexibles** $R^2 = 0.885$ le nuage de points montre également une dispersion notable. Les écarts deviennent plus importants pour les valeurs élevées de $H(10\%B)$, ce qui révèle que le modèle représente moins précisément les comportements extrêmes. Cette situation est due à la forte influence des déplacements latéraux et à la sensibilité des pieux flexibles aux caractéristiques du sol. Toutefois, le modèle parvient à reproduire la tendance globale des résultats expérimentaux.

Tableau 21: Synthèse des coefficients de détermination R^2 de Hu , Ki et $H(10\%B)$

	Flexible (n=19)	Intermédiaire (n=45)	Rigide (n=12)
Hu	0.638	0.812	0.903
Ki (N/mm)	0.720	0.539	0.942
$H(10\%B)$	0,8850	0,5919	0,9896

Interprétation

- ♦ **Pour la charge ultime Hu :** les pieux **rigides** présentent le meilleur ajustement ($R^2 = 0.903$), indiquant que le modèle explique 90% de la variance de Hu pour ce groupe. Les pieux **intermédiaires** ont un R^2 acceptable (0.812). Les pieux **flexibles** montrent le moins bon ajustement ($R^2 = 0.638$), suggérant que le comportement flexible est plus difficile à capturer par la formule de régression.
- ♦ **Pour la raideur initiale Ki :** le modèle est excellent pour les pieux **rigides** ($R^2 = 0.942$), la raideur initiale est très bien prédite pour ce groupe. En revanche, les pieux **intermédiaires** affichent le R^2 le plus faible (0.539), signifiant que seulement 54% de la variance de Ki est expliquée, la formule peine à reproduire la diversité des rigidités dans ce groupe de transition. Les pieux **flexibles** ont un ajustement modéré ($R^2 = 0.720$).
- ♦ **Pour la charge $H(10\%B)$:** c'est la variable la mieux prédite dans l'ensemble. Les pieux **rigides** atteignent un R^2 quasi-parfait (0.990), confirmant l'excellente qualité du modèle pour ce groupe. Les pieux **flexibles** ont un bon ajustement ($R^2 = 0.885$). Les pieux **intermédiaires** restent le cas le plus difficile ($R^2 = 0.592$), cohérent avec les observations sur Hu et Ki .

IV.9 Validation de la supériorité du modèle de régression en loi puissance sur la régression linéaire multiple

La comparaison entre les deux modèles révèle clairement la supériorité du modèle en loi puissance. Le modèle de régression linéaire multiple affiche des coefficients de détermination R^2 quasi nuls pour l'ensemble des paramètres : environ 0,100 pour Hu et $H(10\%B)$, et aussi bas que 0,026 pour Ki des pieux intermédiaires, traduisant son incapacité totale à reproduire le

comportement non linéaire du système sol–pieu. En revanche, le modèle en loi puissance atteint des performances nettement supérieures, avec des R^2 allant jusqu'à 0,903 pour Hu , 0,942 pour Ki et 0,990 pour $H(10\%B)$ dans le cas des pieux rigides. Cet écart considérable confirme que la structure multiplicative de la loi puissance est bien mieux adaptée à la nature complexe des relations entre les paramètres géométriques, géotechniques et la réponse latérale des pieux en sable.

IV.10 Conclusion

Le chapitre IV a permis de développer des modèles de prédiction en loi puissance pour estimer la charge latérale ultime et la raideur initiale des pieux en sable. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les valeurs prédites et les données expérimentales, confirmant la capacité des modèles à représenter le comportement latéral des pieux selon leur rigidité. Ces modèles constituent ainsi une base fiable pour leur validation.

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

V.1 Introduction

Les méthodes analytiques classiques constituent depuis longtemps des outils de référence pour l'estimation du comportement des pieux soumis à des charges latérales. Toutefois, les hypothèses simplificatrices sur lesquelles elles reposent peuvent limiter leur précision face à la complexité de l'interaction sol-pieu. Dans ce contexte, les modèles de prédiction développés dans le chapitre précédent offrent une approche alternative basée sur l'exploitation des données expérimentales.

Ce chapitre est consacré à une étude comparative entre les résultats obtenus à l'aide des modèles proposés et ceux fournis par différentes méthodes analytiques de la littérature. La comparaison porte principalement sur la charge latérale ultime et la raideur initiale, deux paramètres essentiels pour l'analyse et le dimensionnement des pieux.

À travers cette étude, il s'agit d'évaluer la qualité des prédictions, d'identifier les écarts éventuels entre les différentes approches et de mettre en évidence la méthode la plus performante vis-à-vis des résultats expérimentaux. Cette analyse permettra ainsi de mieux apprécier l'apport des modèles développés et leur potentiel d'application en ingénierie géotechnique.

V.2 Synthèse comparative des résultats expérimentaux et analytiques des paramètres Hu et $H(10\%B)$

- Le tableau suivant rassemble les résultats, à la fois expérimentaux et analytiques, des paramètres Hu et $H(10\%)$ pour les différents pieux étudiés, en utilisant plusieurs méthodes de calcul.

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

Tableau 22: Comparaison des résultats des paramètres, H_u et $H(10\%B)$ obtenues par différentes méthodes analytiques

Nom du pieu	H_u (N) mesuré	H_u (N) calculé	$H(10\%B)$ (N) mesuré	$H(10\%B)$ (N) calculé	Broms (1996) (N)	Brinch H 1961(N)	Meyerhof 1995 (N)
D/B=11	28.00	16.15	6.16	7.43	3.83	/	/
D/B=27	38.60	63.35	31.40	63.26	102.94	/	/
/B=30	38.72	69.58	31.62	58.47	133.05	/	/
25.4_WOS_200	433.56	353.97	96.20	64.85	1617.41	/	/
25.4_WOS_400	425.87	384.26	68.10	98.99	276.04	/	/
25.4_WOS_600	187.38	182.59	81.24	88.63	349.36	/	/
25.4_WOS_800	109.90	98.00	59.87	37.96	34.50	/	/
L/D=20	1204.11	405.94	97.52	73.73	109.42	/	/
L/D=25	1023.87	199.80	97.52	85.02	512.91	/	/
L/D=30	1012.21	232.99	156.70	74.73	738.58	/	/
1	86.89	54.57	427.77	124.86	15.36	/	/
5	94.57	79.92	204.41	213.72	20.00	/	/
Test 1	803.93	1645.25	686.60	640.99	2931.77	/	/
Test 3	819.96	1631.73	689.47	633.39	2945.20	/	/
Test 4	1459.08	1028.32	591.54	1431.10	860.92	/	/
Test 6	1503.69	1032.25	611.89	1449.86	864.86	/	/
Test 7	1157.88	1028.32	568.20	1431.10	860.92	/	/

Chapitre V
Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

Test 9	2508.49	1032.25	751.96	1449.86	864.86	/	/
Test 10	2037.66	1028.32	620.81	1431.10	860.92	/	/
Test 12	2756.43	1032.25	703.86	1449.86	864.86	/	/
Horizontal, Dr=30%	135.72	226.30	57.82	66.29	130.52	/	/
Horizontal, Dr=45%	146.19	186.36	75.11	63.52	220.37	/	/
Horizontal, Dr=70%	188.36	215.92	88.55	80.26	391.40	/	/
Free head driven pile	337.06	230.85	67.62	103.90	78.98	/	/
Dry (40%)	236.99	292.84	68.14	102.22	274.28	/	/
Dry (70%)	343.58	280.87	148.73	153.28	367.93	/	/
Dry (90%)	419.89	795.11	171.86	364.66	558.64	/	/
Sat (40%)	206.38	177.58	62.90	49.58	361.84	/	/
Sat (70%)	218.47	180.25	100.40	80.69	470.40	/	/
73 mm Diameter Circular Pile	948.59	1027.01	598.75	489.38	1135.51	/	/
90 mm Diameter Circular Pile	993.97	1298.56	663.11	587.83	1579.30	/	/
102 mm Diameter Circular Pile	1676.93	1752.03	1188.42	702.69	2267.70	/	/
73 mm Square Pile	1062.08	860.26	653.40	537.44	1135.51	/	/
Pile in sand	3210.53	2464.34	2396.30	1622.50	3137.67	/	/

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

Horizontal ground	137.01	325.81	48.70	75.24	153.73	/	/
Horizontal ground	144.68	394.18	51.47	76.24	157.31	/	/
Horizontal ground	211.84	491.03	53.10	80.61	163.67	/	/
6D90	833.91	653.58	673.51	496.63	320.97	/	/
6L90	143.49	132.30	35.53	35.53	147.95	295.90	134.44
6M90	185.86	180.43	47.82	56.23	190.41	380.82	212.09
9L90	323.47	294.80	64.70	90.19	332.89	/	/
9M90	443.14	601.67	97.62	204.69	428.42	/	/
P1	4679.84	2506.42	1256.76	1171.01	6422.59	/	/
Pile in loose sand	7.84	23.46	2.78	7.52	9.15	/	/
Pile in dense sand	40.55	30.22	9.97	8.53	9.77	/	/
2_1	331.91	2881.47	220.30	2246.53	248.02	609.95	374.50
2_2	991.83	1194.9306	465.26	460.18	1049.06	/	/
2_3	430.65	4286.00	287.32	2420.32	328.38	787.92	472.52
2_4	1206.00	1499.67	365.50	542.76	1343.09	/	/
3_1	1159.70	1474.36	387.36	512.11	1315.97	/	/
3_2	622.76	694.99	289.64	303.05	566.87	/	/
3_3	634.41	7924.75	225.10	2755.11	566.87	1307.31	780.35
3_4	883.40	1350.60	297.40	480.51	1196.44	/	/
4_1	3517.47	2983.99	1367.51	909.79	4667.50	/	/
5_1	1998.51	1212.15	1223.71	811.19	805.25	/	/

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

5_3	1989.60	1212.15	1357.34	811.19	805.25	/	/
6_1	398.20	4748.33	156.68	1497.32	451.15	1040.45	527.20
6_2	922.20	1152.38	236.81	237.28	1052.72	/	/
6_3	409.74	4747.62	126.38	1474.83	447.17	1031.27	517.93
6_4	927.89	1138.69	218.08	233.60	1048.08	/	/
8_1	1180.53	1485.54	389.33	525.49	1327.93	/	/
8_2	1219.82	1485.54	364.21	525.49	1327.93	/	/
8_3	442.94	1347.90	173.20	548.03	731.63	/	/
9_4	309.45	3737.02	131.60	1425.77	323.33	1293.05	771.84
10_1	8905.20	6256.76	232.78	1512.03	10587.4 1	/	/
14_1	304.02	2935.62	121.22	1186.38	255.08	1275.62	761.43
TS1	896.98	388.36	209.53	82.56	195.25	/	/
TC1 (1 cycle)	824.47	388.36	198.47	82.56	195.25	/	/
TC2 (1 cycle)	906.58	388.36	285.88	82.56	195.25	/	/
D05	93.06	88.43	27.26	33.70	14.48	/	/
D08	95.92	88.43	28.26	33.70	14.48	/	/
D10	95.90	88.43	33.54	33.70	14.48	/	/
P03	90.11	88.43	26.79	33.70	14.48	/	/
Id=0.25	1395.71	15852.86	306.31	3637.17	869.47	2165.16	892.43
Id=0.5	1431.06	22261.08	653.97	6852.38	1166.60	2905.10	1532.31
Id=0.75	3966.64	33262.85	1174.72	11250.00	1484.97	3697.86	2347.08

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

V.3 Analyse statistique de la charge latérale ultime H_u

- Les résultats statistiques issus de l'application des différentes méthodes de calcul (Broms, Meyerhof, Brinch Hansen) selon la rigidité des pieux sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 23: Comparaison statistique de la charge latérale ultime H_u selon les méthodes de Broms, Meyerhof et Brinch Hansen selon la rigidité des pieux

Cas / Méthode	n (pieux)	μ (N)	σ (N)	CV (%)	Min (N)	Max (N)	R^2
Flexible							
Broms	19	1394.36	1142.65	81.9%	15.36	3351.85	0.0833
Meyerhof	—	—	—	—	—	—	—
Brinch Hansen	—	—	—	—	—	—	—
Intermédiaire							
Broms	45	1140.54	1881.44	165.0%	3.83	10587.41	0.8735
Meyerhof	—	—	—	—	—	—	—
Brinch Hansen	—	—	—	—	—	—	—
Rigide							
Broms	12	539.95	420.55	77.9%	147.95	1484.97	0.8471
Meyerhof	12	777.01	615.37	79.2%	134.44	2347.08	0.8693
Brinch Hansen	12	1399.20	1030.81	73.7%	295.90	3697.86	0.8181

- Les histogrammes suivants présentent la distribution statistique des valeurs de la charge latérale ultime H_u obtenues à partir des méthodes analytiques de Broms, Meyerhof et Brinch-Hansen, afin d'évaluer la dispersion des résultats et leur comportement probabiliste :

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

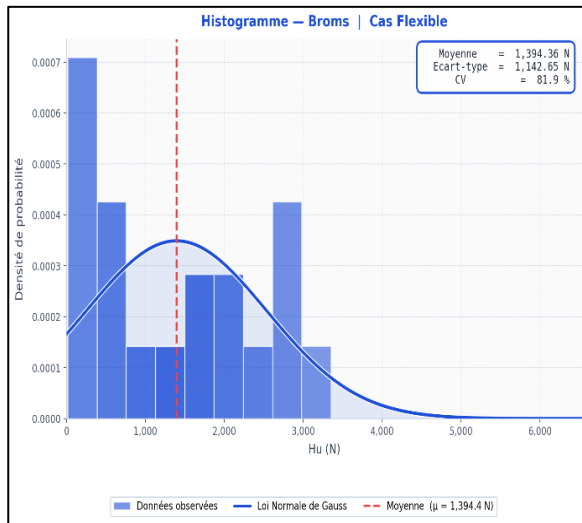


Figure 28: Statistique descriptive de la charge latérale ultime Hu selon Broma (Cas Flexible)

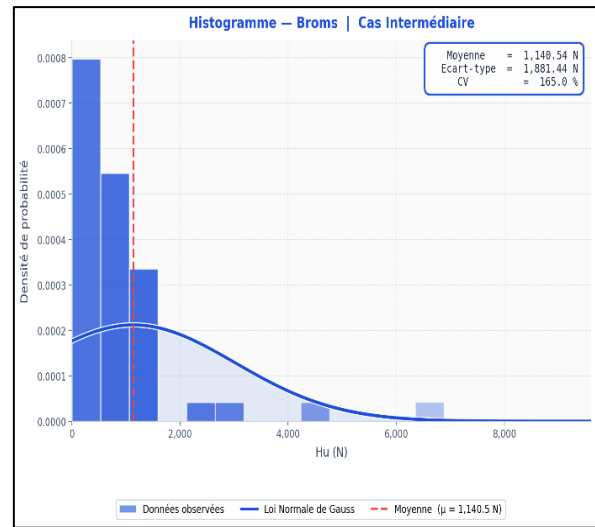


Figure 29 : Statistique descriptive de la charge latérale ultime Hu selon Broma (Cas Intermédiaire)

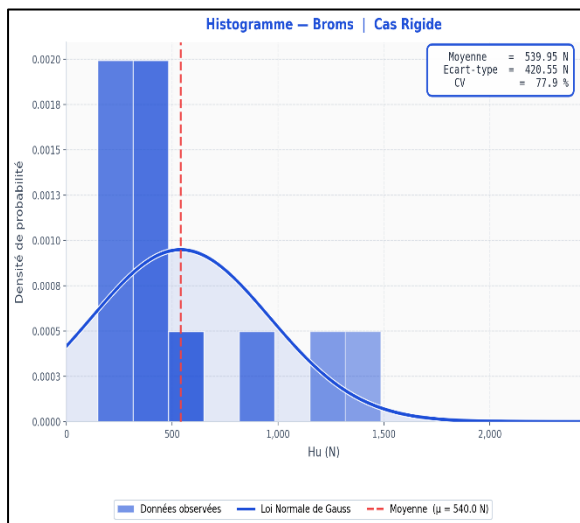


Figure 30: Statistique descriptive de la charge latérale ultime Hu selon Broma (Cas Rigide)

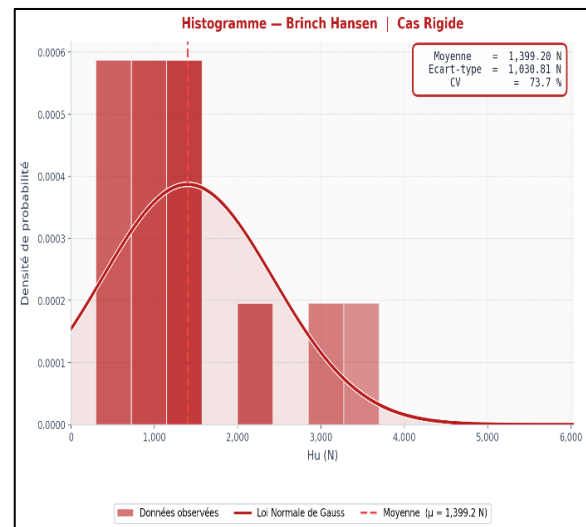


Figure 31: Statistique descriptive de la charge latérale ultime Hu selon Brinch Hansen (Cas Rigide)

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

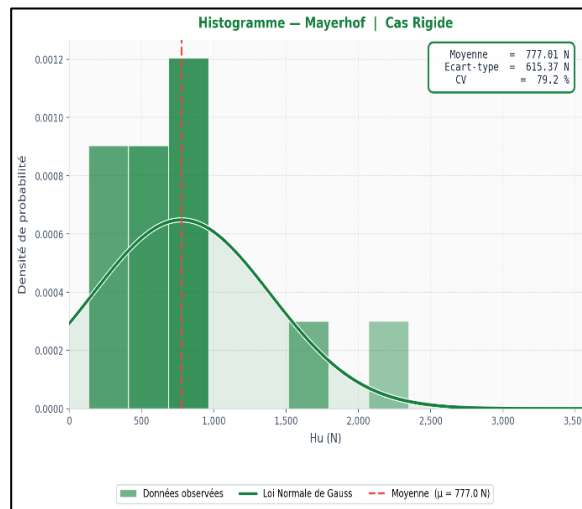


Figure 32: Statistique descriptive de la charge latérale ultime H_u selon Meyerhof (Cas Rigide)

Interprétation

Méthode de Broms (1964)

- **Cas Flexible :** Les valeurs de sont relativement dispersées autour d'une moyenne de 1394 N, ce qui indique une variabilité importante des résultats obtenus.
- **Cas intermédiaire :** La distribution est fortement dispersée avec quelques valeurs très élevées. Le coefficient de variation important montre une faible homogénéité des prédictions.
- **Cas rigide :** Les charges ultimes sont principalement concentrées à de faibles valeurs, mais la dispersion reste très élevée, traduisant une forte variabilité des résultats.

Méthode de Brinch Hansen (1961)

- **Cas rigide :** Les valeurs de sont plus regroupées autour de la moyenne (1390 N), avec une dispersion modérée, ce qui indique des prédictions plus homogènes et plus stables que celles obtenues par la méthode de Broms.

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

Méthode de Meyerhof (1995)

- **Cas rigide :** L'histogramme met en évidence une forte variabilité des charges latérales ultimes (moyenne = 777 N), avec quelques valeurs élevées entraînant une asymétrie de la distribution.

V.4 Synthèse comparative des résultats expérimentaux et analytiques des paramètres Ki

- Le tableau suivant rassemble les résultats, à la fois expérimentaux et analytiques, des paramètres Ki pour les différents pieux étudiés, en utilisant plusieurs méthodes de calcul.

Tableau 24: Comparaison des résultats de la raideur initiale Ki obtenues par différentes méthodes analytiques

Nom du pieu	Ki mesuré (N/mm)	Ki calculé (N/mm)	Reese & Matlock (1961) (N/mm)	Poulos & Davis (1980) (N/mm)
D/B=11	185.38	36.80	70.01	16719.93
D/B=27	118.30	81.62	70.01	16719.93
D/B=30	123.17	78.32	70.01	16719.93
25.4_WOS_200	47.86	49.58	137.63	56800.31
25.4_WOS_400	31.96	34.21	137.63	56800.31
25.4_WOS_600	68.14	56.34	137.63	56800.31
25.4_WOS_800	58.34	40.71	137.63	56800.31
L/D=20	52.62	40.49	92.79	22275.93
L/D=25	73.28	74.78	92.79	22275.93
L/D=30	112.444	69.89	92.79	22275.93
1	22.04	39.07	46.60	8103.65

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

5	50.08	57.36	57.43	9314.08
Test 1	688.09	366.81	568.52	321639.99
Test 3	670.04	369.30	568.52	321639.99
Test 4	307.25	475.21	568.52	321639.99
Test 6	298.19	485.33	568.52	321639.99
Test 7	297.05	475.21	568.52	321639.99
Test 9	310.37	485.33	568.52	321639.99
Test 10	258.04	475.21	568.52	321639.99
Test 12	273.18	485.33	568.52	321639.99
Horizontal, Dr=30%	39.70	27.64	85.39	27755.69
Horizontal, Dr=45%	60.72	38.06	105.62	31983.31
Horizontal, Dr=70%	71.89	56.29	134.57	37588.63
Free head driven pile	46.75	43.21	66.81	14121.74
Dry (40%)	30.86	34.71	154.59	59677.55
Dry (70%)	86.38	60.31	209.74	73138.50
Dry (90%)	96.22	81.21	241.59	80367.98
Sat (40%)	30.16	52.25	154.59	59677.55
Sat (70%)	61.91	86.69	209.74	73138.50
73 mm Diameter Circular Pile	220.34	153.72	1434.49	1251321.39
90 mm Diameter Circular Pile	226.92	165.58	1962.07	2001681.88
102 mm Diameter Circular Pile	401.36	162.87	2290.12	2524118.98

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

73 mm Square Pile	248.47	193.73	1712.09	1631604.43
Pile in sand	199.27	267.13	1673.37	1530726.88
Horizontal ground	30.23	32.99	86.75	28425.39
Horizontal ground	31.94	35.35	107.31	32755.02
Horizontal ground	27.81	40.75	136.73	38495.58
6D90	672.73	331.84	530.22	281025.47
6L90	11.46	10.16	/	166826.77
6M90	16.09	17.22	/	221182.33
9L90	20.55	44.93	242.51	166826.77
9M90	31.59	90.21	370.22	221182.33
P1	188.57	185.42	1483.38	1955089.08
Pile in loose sand	4.32	18.55	48.68	9542.85
Pile in dense sand	13.70	24.07	63.14	11350.33
2_1	85.94	1399.91	/	648885.95
2_2	143.44	164.54	830.37	630798.08
2_3	112.94	1261.52	/	639016.30
2_4	85.12	160.59	830.37	630798.08
3_1	102.39	146.16	830.37	630798.08
3_2	71.06	163.80	842.62	636989.66
3_3	55.85	1041.68	/	636989.66
3_4	70.30	147.54	830.37	630798.08
4_1	147.20	191.04	2494.12	3297411.91

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

5_1	402.18	376.43	1044.49	735042.30
5_3	549.82	376.43	1044.49	735042.30
6_1	40.85	557.03	/	656347.14
6_2	49.07	72.19	869.78	650601.60
6_3	31.19	546.90	/	650601.60
6_4	43.91	71.41	863.96	647695.10
8_1	97.54	152.40	830.37	630798.08
8_2	68.13	152.40	830.37	630798.08
8_3	43.83	168.69	830.37	630798.08
9_4	30.04	473.41	/	636989.66
10_1	400.50	168.23	2443.05	3252241.22
14_1	26.40	384.45	/	636989.66
TS1	84.39	40.53	153.14	58641.00
TC1 (1 cycle)	80.13	40.53	153.14	58641.00
TC2 (1 cycle)	75.48	40.53	153.14	58641.00
D05	32.21	32.05	50.79	8547.78
D08	33.22	32.05	50.79	8547.78
D10	42.93	32.05	50.79	8547.78
P03	27.04	32.05	50.79	8547.78
Id=0.25	38.47	730.27	/	1686624.06
Id=0.5	119.45	1490.37	/	2145985.94
Id=0.75	159.75	2545.52	/	2491489.67

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

V.5 Analyse statistique de la raideur initiale K_i

- Ce tableau montre une analyse statistique de la raideur initiale K_i , calculée avec les méthodes de Reese & Matlock et Poulos & Davis, pour chaque catégorie de rigidité des pieux.

Tableau 25: Comparaison statistique de la raideur initiale K_i selon les méthodes de Reese & Matlock, Poulos & Davis selon la rigidité des pieux

Cas / Méthode	n (pieux)	μ (N)	σ (N)	CV (%)	Min (N)	Max (N)	R^2
Flexible							
Reese & Matlock (1961)	19	168.66	147.16	87.3%	46.60	568.52	0.8546
Poulos & Davis (1980)	19	68933.66	89578.52	129.9%	8103.65	321639.99	0.9108
Intermédiaire							
Reese & Matlock (1961)	45	641.76	659.15	102.7%	48.68	2494.12	0.2587
Poulos & Davis (1980)	45	559738.42	794117.24	141.9%	8547.78	329411.91	0.1798
Rigide							
Reese & Matlock (1961)	—	—	—	—	—	—	—
Poulos & Davis (1980)	12	934827.40	715782.74	76.6%	166826.77	2491489.67	0.5497

- Les histogrammes suivants présentent la distribution statistique des valeurs de la raideur initiale K_i obtenues à partir des méthodes analytiques de Reese & Matlock, Poulos & Davis, afin d'évaluer la dispersion des résultats et leur comportement probabiliste.

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

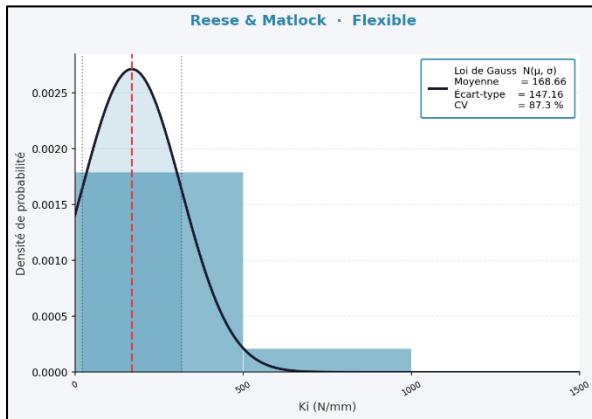


Figure 33: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Reese& Matlock (Cas Flexible)

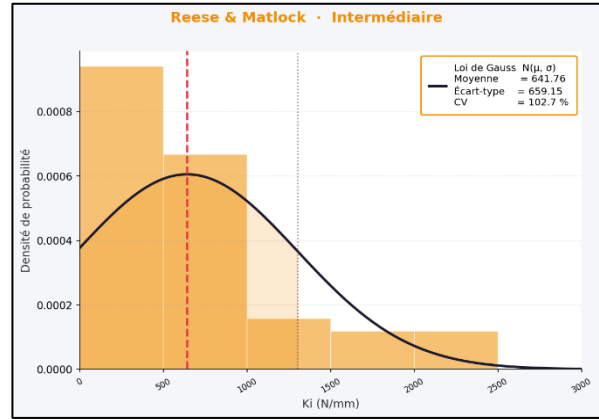


Figure 34: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Reese& Matlock (Cas Intermédiaire)

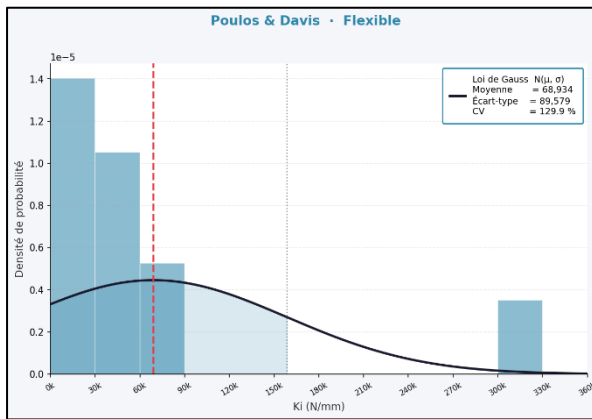


Figure 35: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Poulos& Davis (Cas Flexible)

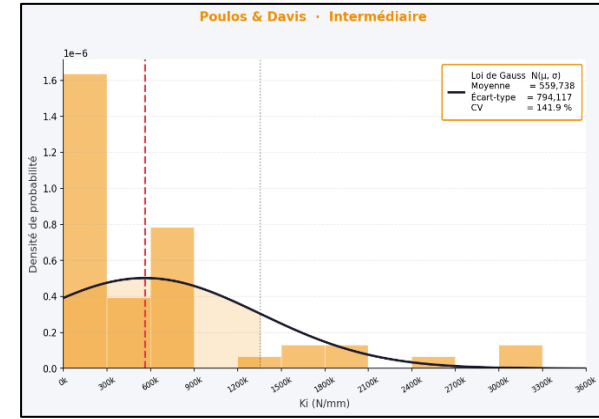


Figure 36: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Poulos& Davis (Cas Intermédiaire)

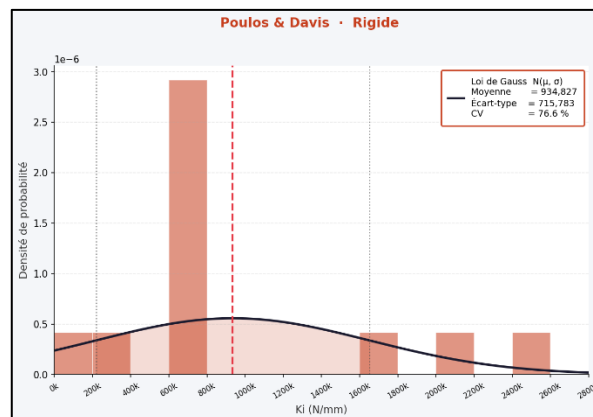


Figure 37: Statistique descriptive de la raideur initiale K_i selon Poulos& Davis (Cas Rigide)

Interprétation

Methode de Reese & Matlock (1961)

- **Cas Flexible** : L'histogramme montre que la majorité des valeurs est concentrée dans les faibles intervalles. La distribution est asymétrique vers la droite, ce qui indique la présence de quelques valeurs élevées. Cela traduit une variabilité importante de la raideur initiale.
- **Cas intermédiaire** : Les valeurs de sont plus dispersées que dans le cas flexible. L'asymétrie à droite reste marquée, montrant que certains pieux présentent des raideurs nettement plus élevées que la moyenne.

Methode de Poulos & Davis (1980)

- **Cas Flexible** : L'histogramme présente une forte concentration des valeurs faibles avec quelques valeurs extrêmes élevées. Cette distribution indique une importante hétérogénéité des résultats pour les pieux flexibles.
- **Cas intermédiaire** : La plupart des valeurs sont regroupées dans les faibles intervalles, tandis que quelques valeurs élevées augmentent la dispersion. Cela montre une variabilité significative de la raideur initiale.
- **Cas rigide** : La distribution est plus étalée, avec des valeurs réparties sur plusieurs intervalles. Cette dispersion reflète l'influence des caractéristiques du système sol-pieu sur la raideur initiale des pieux rigides.

V.6 Évaluation des méthodes de prédiction de la charge latérale ultime

Hu* et de la raideur initiale *Ki

V.6.1 Évaluation des méthodes de prédiction de la charge latérale ultime

Hu

- Le tableau ci-dessous montre les coefficients R^2 qu'on a obtenus avec les différentes méthodes pour estimer la charge latérale ultime Hu , selon que les pieux se comportent de manière flexible, intermédiaire ou rigide. Le R^2 , c'est un indicateur de la qualité de l'ajustement : plus il se rapproche de 1, plus la corrélation est bonne.

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

Tableau 26: Synthèse des coefficients de détermination R^2 de la charge latérale ultime H_u des méthodes étudiées

Méthode	Flexible (n=19)	Intermédiaire (n=45)	Rigide (n=12)
Formule proposé	0.638	0.812	0.903
Broms (1964)	0.083	0.874	0.847
Meyerhof (1995)	—	—	0.869
Brinch Hansen (1961)	—	—	0.818

Interprétation

Ce premier tableau nous permet de comparer l'efficacité des différentes méthodes de prédiction de la charge latérale ultime H_u , en fonction du comportement des pieux.

- Commençons par **les pieux flexibles**, avec un échantillon de 19 cas. Ici, la formule proposée se démarque avec un R^2 de 0,638, soit la meilleure performance parmi les méthodes applicables. En revanche, la méthode de Broms (1964) affiche un R^2 très faible de 0,083, ce qui indique une corrélation quasi inexistante pour ce type de comportement. Les approches de Meyerhof (1995) et Brinch Hansen (1961) ne sont tout simplement pas adaptées ici. Cela montre que, pour les pieux flexibles, la loi puissance offre une pertinence relative, même si la corrélation reste modérée.
- Passons aux **pieux intermédiaires**, avec 45 observations. Cette fois, la méthode de Broms (1964) obtient le meilleur R^2 , à 0,874, suivie de près par la formule proposée avec 0,812. Les deux méthodes montrent une bonne capacité prédictive, et leurs performances sont assez proches. Encore une fois, Meyerhof et Brinch Hansen ne sont pas applicables à cette catégorie.
- Enfin, pour **les pieux rigides**, avec 12 cas, toutes les méthodes sont utilisables et donnent des R^2 élevés. La formule proposée se distingue nettement avec un score de 0,903, devant Meyerhof (0,869), Broms (0,847) et Brinch Hansen (0,818). Ce résultat confirme que la formule proposée excelle particulièrement pour les pieux rigides.

En fin de compte, ce qui fait la force de la formule proposée, c'est sa capacité à s'adapter à tous les types de comportement, quel que soit le contexte. Ses résultats sont souvent meilleurs et parfois au moins aussi bons que ceux obtenus avec les approches

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

plus traditionnelles. Mais là où elle se démarque vraiment, c'est dans le cas des pieux rigides: elle s'impose alors comme un outil particulièrement fiable, sur lequel on peut compter sans hésitation.

V.6.2 Évaluation des méthodes de prédiction de la raideur initiale K_i

- Le tableau ci-dessous montre les coefficients de détermination R^2 obtenus pour prédire la raideur initiale K_i avec les différentes méthodes qu'on a étudiées, en fonction du comportement des pieux.

Tableau 27: Synthèse des coefficients de détermination R^2 de la raideur initiale K_i des méthodes étudiées

Méthode	Flexible (n=19)	Intermédiaire (n=45)	Rigide (n=12)
La formule proposée	0.720	0.539	0.942
Reese & Matlock (1961)	0.855	0.259	—
Poulos & Davis (1980)	0.911	0.180	0.550

Interprétation

Ce deuxième tableau s'intéresse à la prédiction de la raideur initiale K_i , un paramètre clé qui décrit le comportement d'un pieu lorsqu'il commence à subir un chargement latéral. En clair, il s'agit de voir comment les différentes approches parviennent à capturer cette raideur dès les premiers instants de la sollicitation.

- Pour **les pieux flexibles**, qui représentent un échantillon de 19 cas, les méthodes de Poulos & Davis (1980) et de Reese & Matlock (1961) se montrent légèrement plus performantes que la formule proposée, avec des coefficients R^2 de 0,911 et 0,855 respectivement, contre 0,720 pour cette dernière. Cela dit, les trois approches affichent une bonne corrélation, ce qui indique qu'elles arrivent toutes à bien reproduire la raideur initiale des pieux flexibles. Autrement dit, pour ce type de pieu, les modèles classiques restent tout à fait valables.
- En revanche, la donne change radicalement pour **les pieux intermédiaires** (45 cas). Ici, la formule proposée se démarque nettement avec un R^2 de 0,539, tandis que les

Chapitre V

Comparaison des modèles de prédiction proposés avec les approches empiriques classiques

méthodes de Reese & Matlock (0,259) et de Poulos & Davis (0,180) peinent à suivre, avec des corrélations faibles, voire insuffisantes. Ce contraste montre que la loi puissance est bien mieux adaptée à cette catégorie, les méthodes traditionnelles n'arrivant tout simplement pas à capturer correctement la raideur initiale des pieux intermédiaires. C'est un peu comme si ces dernières étaient conçues pour un autre type de comportement.

- Pour **les pieux rigides** (12 cas), la formule proposée atteint son sommet avec un R^2 de 0,942, ce qui traduit une corrélation très forte, presque parfaite. En comparaison, la méthode de Poulos & Davis ne décolle pas avec un R^2 de 0,550, et Reese & Matlock n'est même pas applicable ici. Sans surprise, la loi puissance s'impose comme la méthode de choix pour prédire K dans cette catégorie.

Pour faire simple, les méthodes analytiques classiques restent tout à fait valables pour les pieux flexibles. Mais dès qu'on passe aux pieux intermédiaires ou rigides, la formule proposée s'impose clairement comme la meilleure option. C'est d'ailleurs dans ces deux catégories qu'on voit le mieux les faiblesses des approches traditionnelles : elles montrent leurs limites et peinent à s'adapter à ce type de configurations plus spécifiques.

V.7 Conclusion

L'étude comparative réalisée a permis d'évaluer les performances des modèles développés par rapport aux méthodes analytiques classiques. Les résultats montrent une bonne concordance avec les données expérimentales et mettent en évidence la capacité des modèles proposés à prédire efficacement la charge latérale ultime et la raideur initiale des pieux. Cette comparaison confirme ainsi l'intérêt et la fiabilité de l'approche adoptée pour l'analyse du comportement latéral des pieux en sable.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, trois modèles de prédiction en loi puissance ont été développés pour estimer la charge ultime H_u , la raideur initiale K_i et la charge $H(10\%B)$ des pieux isolés latéralement chargés dans le sable. Cette démarche, fondée sur une régression multivariable linéarisée par transformation logarithmique a été appliquée à une base de soixante-seize pieux à petite échelle dans des sols sableux issus d'essais expérimentaux reconnus, couvrant une large gamme de configurations géométriques et géotechniques.

La classification préalable des pieux selon la méthode de Poulos & Hull (1992) s'est avérée décisive. En classant les pieux rigides, intermédiaires et flexibles, les modèles ont pu être calibrés de manière ciblée, ce qui a significativement amélioré leur précision par rapport à une approche globale indifférenciée. Les pieux rigides ont donné les meilleures performances, avec des coefficients de détermination atteignant $R^2 = 0.99$ pour $H(10\%B)$, $R^2 = 0.94$ pour K_i et $R^2 = 0.90$ pour H_u , confirmant que la loi puissance est particulièrement bien adaptée à cette catégorie dont le comportement est fortement déterminé par les paramètres géométriques.

En revanche, les pieux intermédiaires présentent les dispersions les plus importantes, notamment pour i $R^2 = 0.54$. Ce résultat n'est pas une défaillance du modèle, mais le reflet d'une réalité physique : les pieux intermédiaires occupent une zone de transition entre comportement rigide et flexible, rendant leur réponse plus sensible à des paramètres non entièrement capturés par les variables retenues. Ce constat souligne la nécessité d'approfondir la modélisation de cette catégorie dans les travaux futurs.

La comparaison avec les méthodes analytiques classiques de Broms (1964), Brinch Hansen (1961) et Meyerhof (1995) a mis en évidence les limites de ces approches, notamment leur tendance à surestimer fortement la charge ultime pour les pieux rigides dans certaines configurations. Les modèles développés dans ce mémoire produisent des estimations plus proches des valeurs expérimentales, tout en offrant un temps de calcul très court et une facilité d'application directe.

En définitive, ce travail démontre que les outils statistiques d'apprentissage, même dans leur forme la plus classique comme la régression en loi puissance peuvent constituer une alternative crédible et efficace aux méthodes de dimensionnement classiques en géotechnique. La fiabilité des résultats obtenus ouvre la voie à des développements futurs, tels que l'enrichissement de la base de données, l'extension aux sols cohérents ou stratifiés, et l'intégration de techniques d'intelligence artificielle plus avancées (réseaux de neurones,

Conclusion générale

machines à vecteurs de support) afin de mieux appréhender la complexité du comportement des pieux intermédiaires et flexibles.

Annexes

Annexe1 : Les courbes des nuages de points de la charge ultime Hu

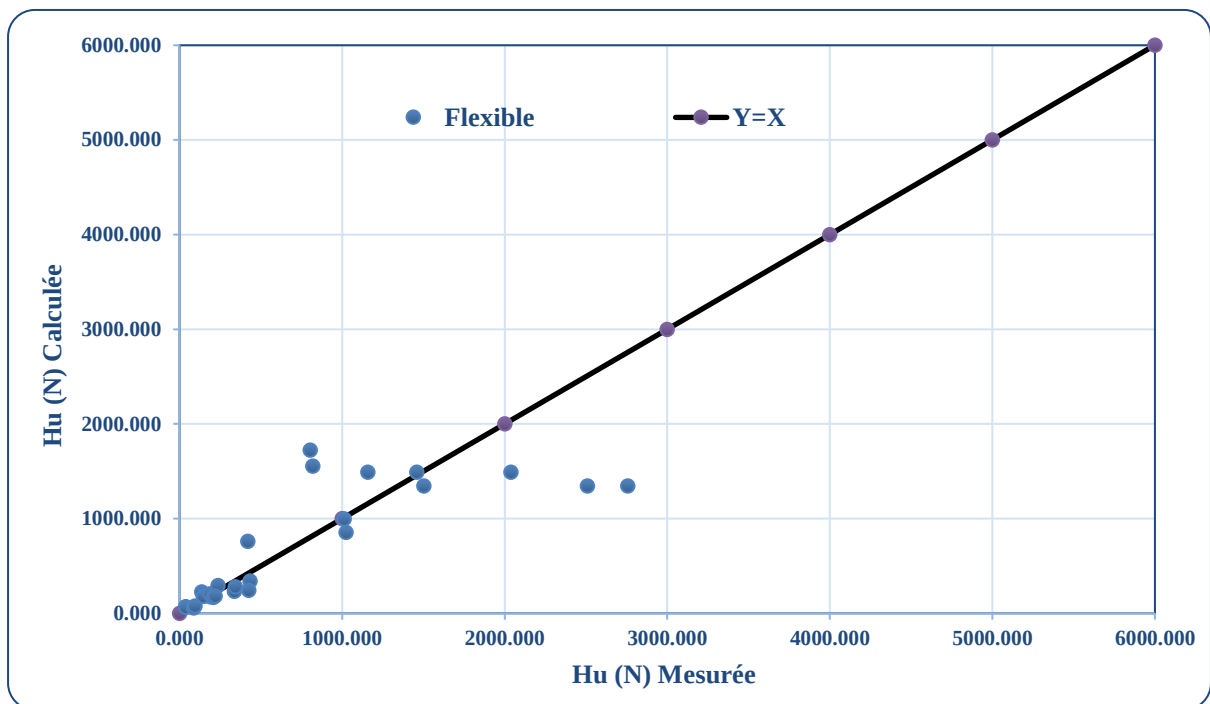


Figure 39: dispersion des valeurs de Hu (N) calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas flexible)

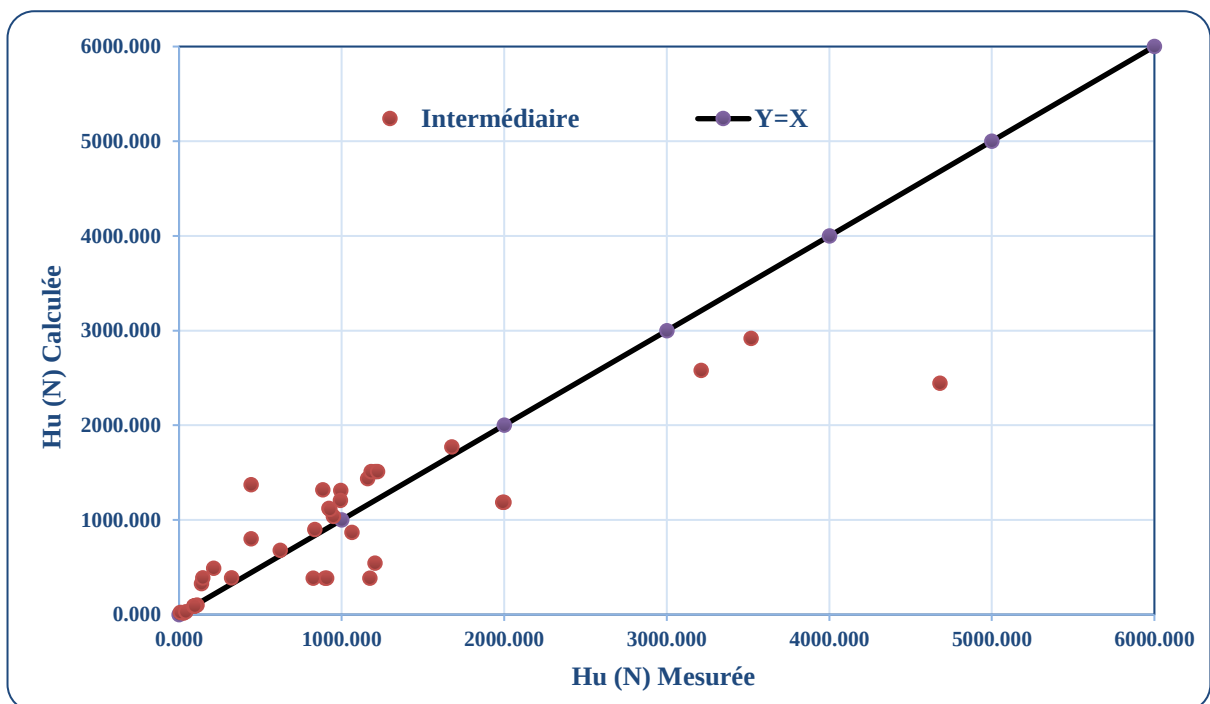


Figure 40: dispersion des valeurs de Hu (N) calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas intermédiaire)

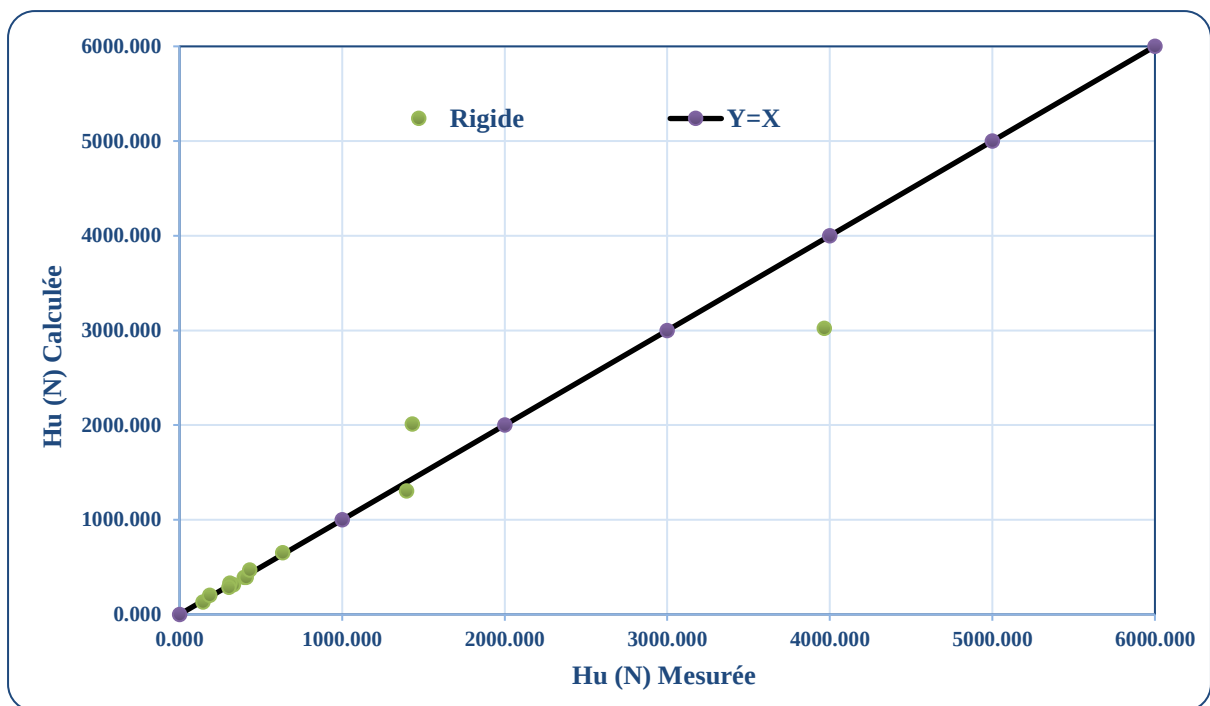


Figure 41: dispersion des valeurs de $Hu(N)$ calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas rigide)

Annexe2 : Les courbes des nuages de points de la raideur initiale Ki

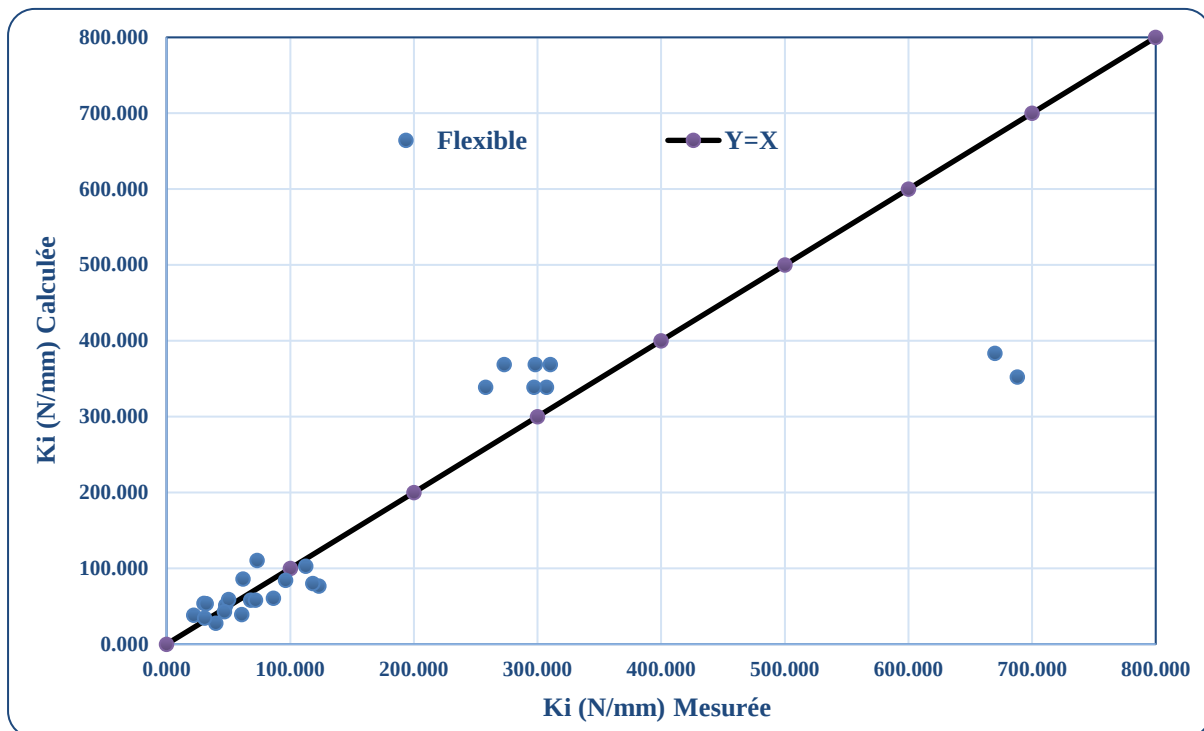


Figure 42: dispersion des valeurs de Ki (N/mm) calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas flexible)

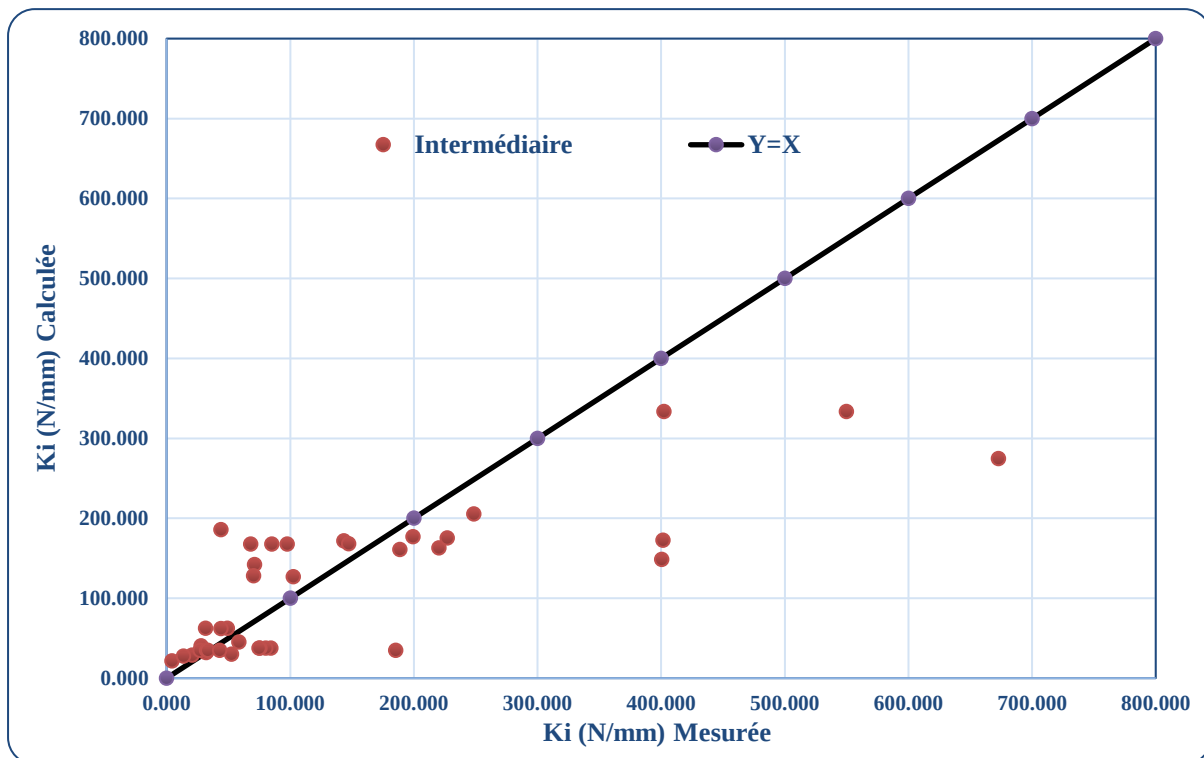


Figure 43: dispersion des valeurs de Ki (N/mm) calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas intermédiaire)

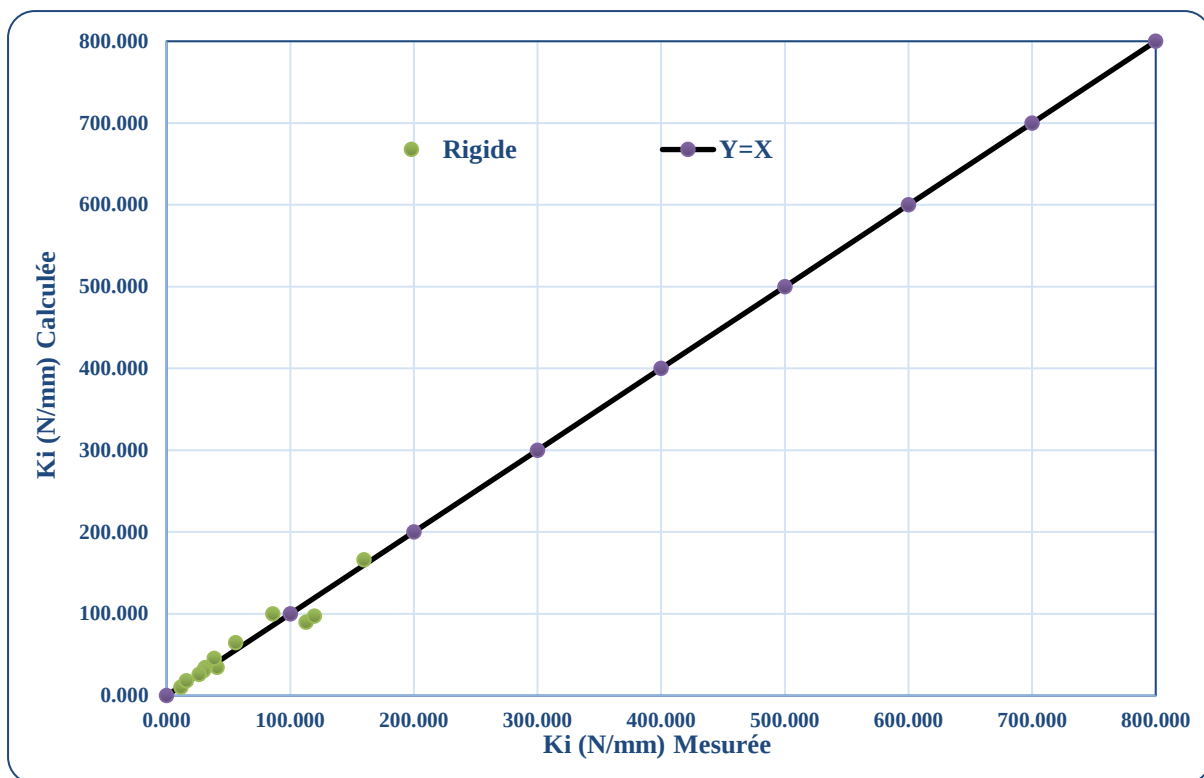


Figure 44: dispersion des valeurs de K_i (N/mm) calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas rigide)

Annexe3 : Les courbes des nuages de points de la charge $H(10\%B)$

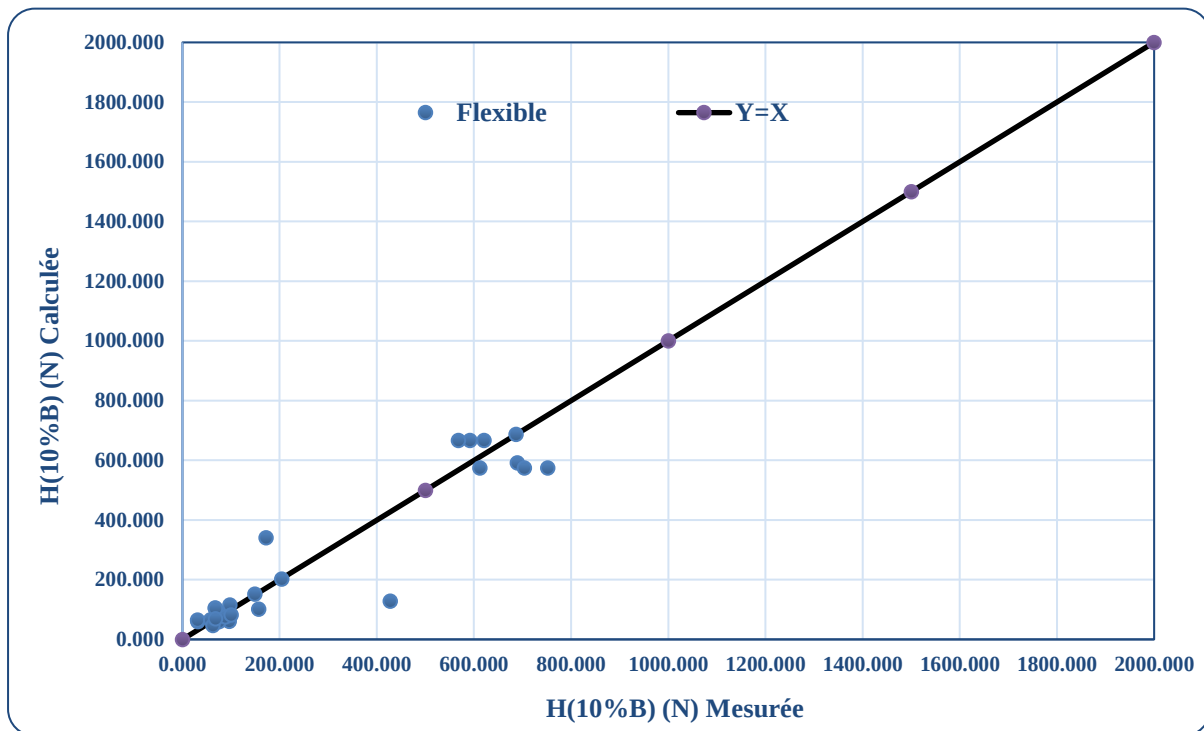


Figure 45: dispersion des valeurs de $H(10\%B)(N)$ calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas flexible)

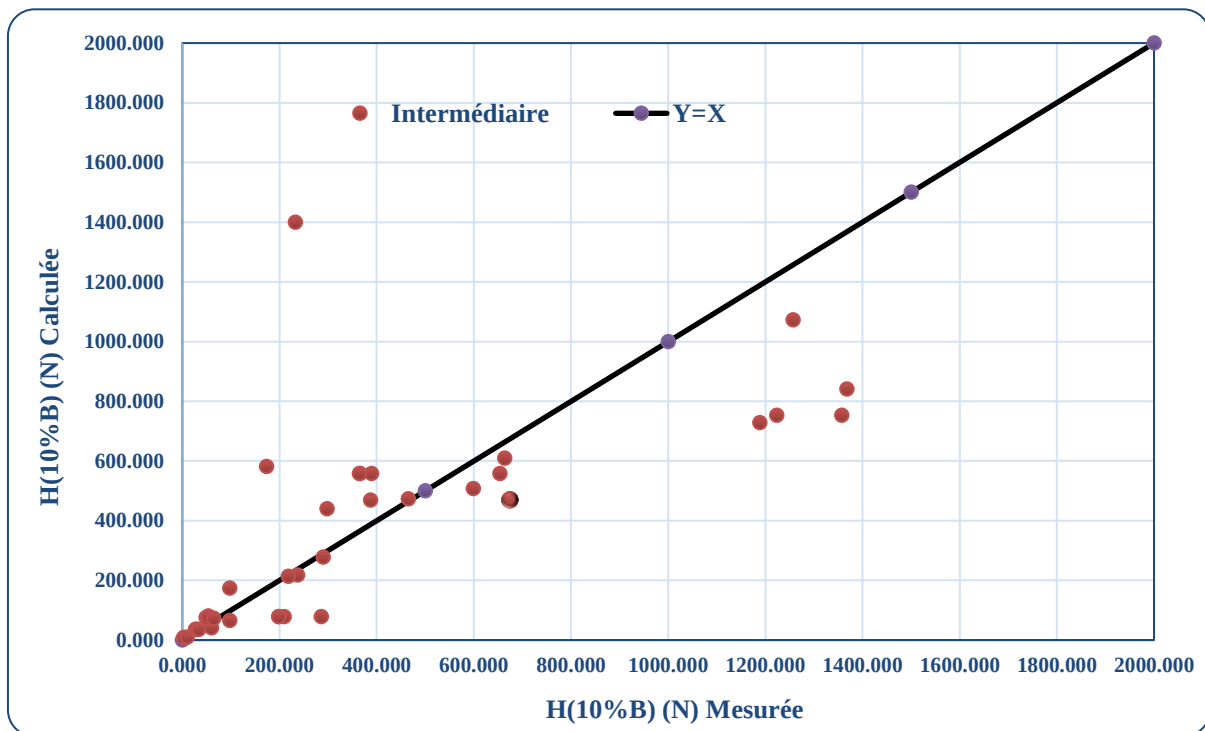


Figure 46: dispersion des valeurs de $H(10\%B)(N)$ calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas intermédiaire)

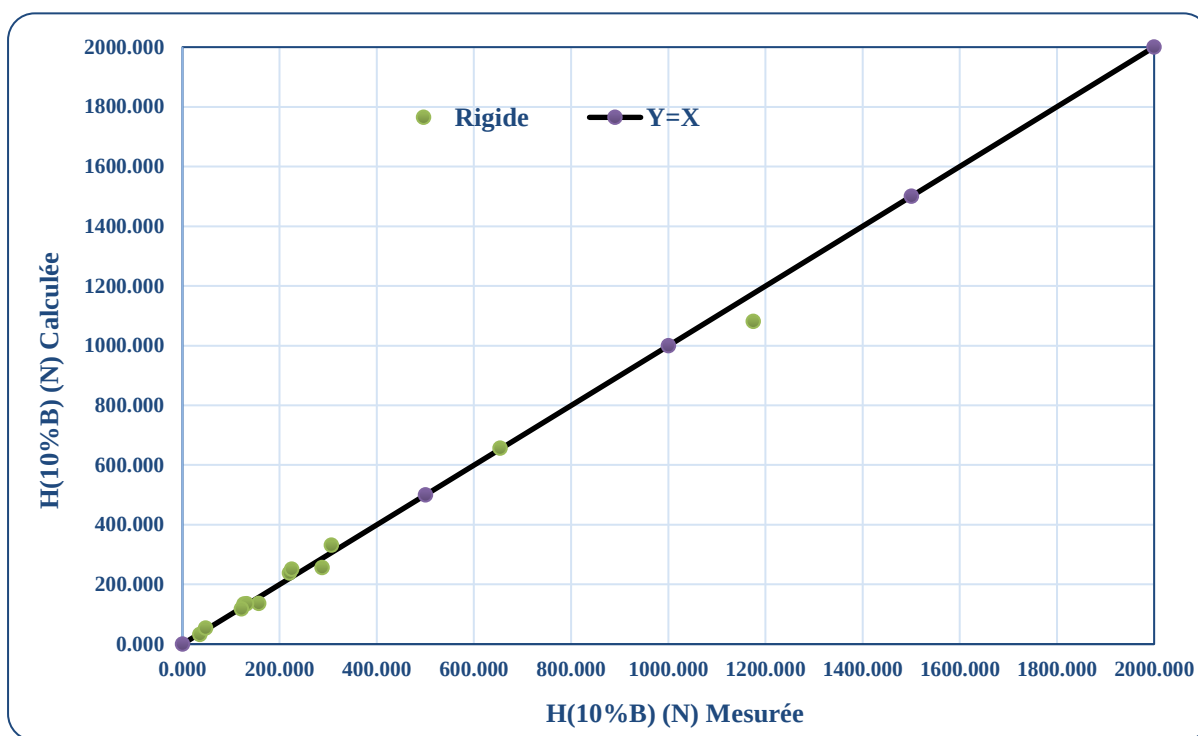


Figure 47: dispersion des valeurs de $H(10\%B)(N)$ calculées en fonction des valeurs mesurées (Cas rigide)

Références bibliographiques

- Abdelkarim, N. (2022).** *Dimensionnement d'un quai sur pieux cas : Marina baie d'Alger.*
- Agaiby, S., Kulhawy, F. H., & Trautmann, C. H. (1991).** *Experimental study of drained lateral and moment behavior of drilled shafts during static and cyclic loading.* Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (United States); Cornell Univ
- Al-Amery, S. S., & Al-Dahlaki, M. H. (2025).** Behavior of Piles subjected to Combined Axial and Lateral Loading. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(2), P.P.21187-21196.
- AOUADJ, A. (s. d.).** *INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN GÉOTECHNIQUE–APPLICATION DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE DANS LES PROJETS DE FONDATIONS ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN GEOTECHNICS-APPLICATION OF MACHINE LEARNING IN FOUNDATION ENGINEERING.*
- Begum, N., & Muthukkumaran, K. (2009).** Experimental investigation on single model pile in sloping ground under lateral load. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 3(1), P.P. 133-146.
- BOUAFIA, A. (2018).** Calcul des ouvrages géotechniques Problèmes résolus. *Polycopié, mémoire d'ingénierie. Spécialité Génie Civil. Blida: Université Saâd Dahleb*
- Bouafia, A. (2026).** *Calcul des fondations : Conformément au nouveau règlement géotechnique DTR BC-2.33.*
- Bouafia, A., Teraa, S., & Bourihane, S. (1996, décembre 8).** Modélisation expérimentale du comportement d'un pieu chargé horizontalement. *Premier Séminaire National en Génie-Civil (Biskra'96).* Premier Séminaire National en Génie-Civil — Biskra'96.
- Boumaza Nour El Houda, K. M. (2015).** *Conception et calcul des fondations sur pieux.*
- Broms, B. B. (1964).** Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 90(3), P.P. 123-156.
- Chari, T. R., & Meyerhof, G. G. (1983).** Ultimate capacity of rigid single piles under inclined loads in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), P.P. 849-854.
- Foucart, T. (2006).** Colinéarité et régression linéaire. *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences*, (173).
- Gandhi, S. R., & Selvam, S. (1997).** Group effect on driven piles under lateral load. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(8), P.P. 702-709.
- Hansen, J. B. (1961).** The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. *Bulletin 12, Danish Geotech. Institute*, 1-9.

Références bibliographiques

- Joo, J. S. (1985).** *Behaviour of large scale rigid model piles under inclined loads in sand.*
- Laouet, I., Benayache, K., & Lamara, M. E. (2021).** *Étude et modélisation du comportement des pieux sous charges latérales.*
- Lin, H., Ni, L., Suleiman, M. T., & Raich, A. (2015).** Interaction between laterally loaded pile and surrounding soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 141(4), 04014119.
- Little, R. L., & Briaud, J.-Lou. (1988).** *A pressuremeter method for single piles subjected to cyclic lateral loads in sand.* US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Meyerhof, G. (1995).** Standard penetration tests and pile behaviour under lateral loads in cohesionless soils. *Canadian geotechnical journal*, 32(5), P.P. 913-916.
- Muthukkumaran, K. (2014).** Effect of slope and loading direction on laterally loaded piles in cohesionless soil. *International Journal of Geomechanics*, 14(1), 1-7.
- Muthukkumaran, K., & AR, P. (2015).** Behaviour of laterally loaded socketed pile in multi-layered soil-rock profile. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 3(2), P.P.51-55.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980).** *Pile foundation analysis and design* (Numéro Monograph).
- Prasad, Y. V., & Chari, T. (1999).** Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soils. *Soils and Foundations*, 39(2), P.P. 21-29.
- Qaysar, S., & Ilies, S. (2021).** *Dimensionnement des fondations sur pieux sous charge horizontale—Étude comparative des méthodes de calcul dans un sol sableux saturé.*
- Qin, H., & Guo, W. D. (2007).** *An experimental study on cyclic loading of piles in sand.* Common Ground, 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics.
- Reese, L. C. (1965).** *Non-dimensional solution for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth.* Proc. 8th Texas Conf. SMFE.
- Tak Kim, B., Kim, N.-K., Jin Lee, W., & Su Kim, Y. (2004).** Experimental load–transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(4), P.P. 416-425.
- Verdoolaege, G. (2015).** A new robust regression method based on minimization of geodesic distances on a probabilistic manifold: Application to power laws. *Entropy*, 17(7), P.P.4602-4626.
- Vidic, S., Kulhawy, F. H., & Trautmann, C. H. (1992).** *Experimental study of drained behavior of drilled shafts during static inclined loading. Final report.* Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (United States); Cornell Univ

Références bibliographiques

- Yuan, B., Chen, R., Teng, J., Wang, Y., Chen, W., Peng, T., Feng, Z., Yu, Y., & Dong, J. (2015). Effect of sand relative density on response of a laterally loaded pile and sand deformation. *Journal of Chemistry*, 2015(1), 891212.
- Zamoum, S. (2015). *Modélisation du comportement d'un quai sur pieux. Application à un quai du port de Djen-Djen (Jijel)*.
- 김병탁, 김영수, & 서인식. (1999). 사질토 지반에서 단일 강성말뚝의 수평거동에 대한 시공방법의 영향. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 15(6), P.P. 29-44.
- 백성하, 김준영, 이승환, & 정충기. (2017). 모래지반에서 횡방향 반복하중을 받는 말뚝의 영구수평변위 평가. *한국지반공학회논문집*, 33(2), P.P. 17-26.

Résumé

Ce travail de recherche traite de l'application de l'intelligence artificielle (**IA**) pour prédire le comportement des pieux sous charge latérale, en se focalisant sur la charge ultime (**H_u**), la raideur initiale (**K_i**) et la charge au **10%** de diamètre B du pieu (**$H(10\%B)$**).

À partir d'une base de données expérimentale de 76 pieux de Small-scale dans des sols sableux en monde, des modèles de prédiction ont été développés en utilisant des paramètres géométriques et géotechniques clés (le diamètre, la longueur, le rapport d'élancement, la rigidité en flexion, la densité relative du sol et le poids volumique.). Cette démarche axée sur les données vise à proposer une alternative fiable aux formules analytiques conventionnelles. L'efficacité des modèles d'IA proposés est finalement validée par une analyse comparative avec les méthodes empiriques existantes dans la littérature.

Mots-clés : pieux latéralement chargés, sable, charge ultime, raideur initiale, régression en loi puissance, intelligence artificielle, modèles de prédiction.

Abstract

This research study examines the application of artificial intelligence (AI) to predict the behavior of piles under lateral loading, focusing on the ultimate load (**H_u**), the initial stiffness (**K_i**), and the load at 10% of the pile diameter (**$H(10\%B)$**).

Based on an experimental database of 76 small-scale piles in sandy soils worldwide, prediction models were developed using key geometric and geotechnical parameters (diameter, length, slenderness ratio, flexural stiffness, relative soil density, and unit weight). This data-driven approach aims to provide a reliable alternative to conventional analytical formulas. The effectiveness of the proposed AI models is ultimately validated through a comparative analysis with existing empirical methods in the literature.

Keywords: laterally loaded piles, sand, ultimate load, initial stiffness, power-law regression, artificial intelligence, prediction models.