



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDA-
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour obtention du diplôme de Master en Génie Civil

OPTION : GÉOTECHNIQUE.

THEME

EVALUATION DES CRITERES DE CAPACITE PORTANTE
ET DE RESISTANCE LATERALE D' UN PIEU ISOLE SUR LA BASE
DES ESSAIS DE CHARGEMENT EN VRAIE GRANDEUR

Présenté par :

- **NEFFAD ABDEL-HAMID**
- **TERKHACHE AHMED DIAA-EDINNE**

Encadré par :

P^r : ALI - BOUAFIA


Promotion 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et nous passons les obscures subtilités de la langue française, le choix de la formule de remerciements est difficile.

Nos premiers remerciements vont pour le bon dieu, le tout puissant, qui nous avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail, et sincèrement remercier ceux qui ont accepté de juger ce travail. , pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre encadreur, Pr BOUAFIA ALI , qui a fait tout son possible pour nous aider. Pour avoir su nous guider dans ce travail, qui a fait tout son possible pour nous aider. Pour ses conseils, son intérêt et sa grande disponibilité pour avoir encore et toujours posé les bonnes questions, pour ses conseils et son intérêt. Merci Pr BOUAFIA Ali.

Nous remercions parallèlement l'ensemble des enseignants de l'institut de génie civil qui ont contribué à notre formation, et nous souhaitons le bon courage à toute la promo 2021-2022 du génie civil.

En fin, nos remerciements à nos amis du département de génie civil, spécialement à la section masters géotechnique, et toutes les personnes qui ont contribué de près ou loin à la réalisation de ce travail.



ABSTRACT

Deep foundations, or so-called "piles", must support two types of loads, the first vertical or axial, which is represented in buildings, and the second in a horizontal or lateral form, such as earthquakes, winds, vehicle braking and ground thrust from access dams, etc. applicable to this type of foundation.

Our research work presents an analysis of two databases of vertical and horizontal load tests carried out in many countries around the world, and it is limited to 50 vertical tests and 123 horizontal tests.

First, we presented a bibliographical study which included both the performance of vertical and horizontal loading tests and presentation on the criteria of bearing capacity and lateral resistance of piles, Secondly, a descriptive study was presented for each databases of vertical and horizontal pile loading tests. Then we have the adjustment and the interpretation of the loading curves in order to evaluate the capacity by applying the empirical or theoretical criteria of bearing capacity and the lateral resistance available in geotechnical literature. Finally, we presented a comparative study of the bearing capacity criteria and lateral resistance. Through the determination of the statistical parameters, a general classification was made for the best criterion providing important results.

Keywords : Pile, Loading test, Bearing capacity, Lateral resistance.

ملخص

الأساسات العميقة، أو ما يسمى بـ "الركائز"، يجب أن تدعم نوعين من الأحمال، الأول عمودي أو محوري، ويمثل في المباني، والثاني في شكل أفقي أو جانبي، مثل الزلازل والرياح وفرملة المركبات والأرض. الدفع من سدود الوصول، وما إلى ذلك المطبقة على هذا النوع من الأساسات.

يقدم عملنا البحثي تحليل قاعدتي بيانات لاختبارات الحمل الرأسي والأفقي التي تم إجراؤها في العديد من البلدان حول العالم، وهي تقتصر على 50 اختباراً رأسياً و123 اختباراً أفقياً.

أولاً، قدمنا دراسة بيليوغرافية تضمنت كلاً من أداء اختبارات التحميل الرأسي والأفقي والعرض التقديمي على معايير قدرة التحمل والمقاومة الجانبية للأكوام، وثانياً، تم تقديم دراسة وصفية لكل قاعدة بيانات لاختبارات تحميل الركائز الرأسية والأفقية. ثم لدينا تعديل وتفسير منحنيات التحميل من أجل تقييم السعة من خلال تطبيق المعايير التجريبية أو النظرية لقدرة التحمل والمقاومة الجانبية المتاحة في الأدبيات الجيوتقنية. أخيراً، قدمنا دراسة مقارنة لمعايير قدرة التحمل والمقاومة الجانبية. من خلال تحديد المعلمات الإحصائية، تم إجراء تصنيف عام لأفضل معيار يقدم نتائج مهمة.

الكلمات المفتاحية : الركيزة ، اختبار التحميل، قدرة التحمل، المقاومة الجانبي.

RESUME

Les fondations profondes, ou dites « pieux », doivent supporter deux types de charges, la première verticale ou axiale, qui est représentée dans les bâtiments, et la seconde sous une forme horizontale ou latérale, comme les tremblements de terre, les vents, le freinage des véhicules et la poussée du sol des barrages d'accès, etc... applicable à ce type de fondation.

Notre travail de recherche présente une analyse de deux bases de données d'essais de chargement verticaux et horizontaux réalisés dans de nombreux pays à travers le monde, et cela se limite à 50 essais verticaux et 123 essais horizontaux.

Dans un premier temps, nous avons présenté une étude bibliographique qui comprenait à la fois la réalisation des essais de chargement vertical et horizontal et présentation sur les critères de capacité portante et la résistance latérale des pieux, Deuxièmement, une étude descriptive a été présentée pour chacune des bases de données d'essais de chargement des pieux verticaux et horizontaux. Puis nous avons effectué l'ajustement et l'interprétation des courbes de chargement afin d'évaluer la capacité en appliquant les critères empiriques ou théoriques de capacité portante et la résistance latérale disponibles en littérature géotechnique. Enfin nous avons présenté une étude comparative des critères de capacité portante et résistance latérale. À travers de la détermination des paramètres statistiques, une classification générale a été faite pour le meilleur critère qu'il y a fournit des résultats importants.

Mots-Clefs : Pieu, Essai de chargement, Capacité portante, Résistance latérale.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS

ABSTRACT I

ملخص II

RESUME III

TABLE DES MATIÈRES IV

LISTE DES FIGURES XI

LISTE DES TABLEAUX XVII

LISTE DES SYMBOLES XXII

INTRODUCTION GENERALE 01

Chapitre 1 : Etude bibliographique des critères de capacité portante des pieux

1.	Essais de chargement vertical des pieux in-situ.....	02
1.1.	Introduction	02
1.2.	Principe de l'essais et l'appareillage	02
1.3.	Procédures de chargement des pieux	03
1.3.1.	Procédure Lente (Slow Maintained Load Test)	03
1.3.2.	Procédure rapid (Quick Maintained Load Test)	04
1.3.3.	Procédure avec un taux constant d'enfoncement	05
1.3.4.	Procédure de la norme NF P 94-150-1(1999)	05
1.4.	Systèmes de chargement vertical	06
1.4.1.	Système de bloc « Kenteledge »	06
1.4.2.	Système avec pieux de réactions	07
1.4.3.	Système O-Cell	08
1.5.	Interprétation d'essai de chargement vertical	09

1.5.1.	Détermination de la charge ultime Q_u	09
1.6.	Présentation des critères de la capacité portante	12
1.6.1.	Critère conventionnel (10% de b)	12
1.6.2.	Critère de Bulter et Hoy (1977) (ou critère de la tangente)	12
1.6.3.	Critère d'hyperbolique	13
1.6.4.	Critère de Davisson (1972) (ou critère de la valeur limite)	14
1.6.5.	Critère de de beer 1968 (ou critère bi-logarithmique)	15
1.6.6.	Critère de décourt (ou critère de la raideur sécante)	16
1.6.7.	Critère de FDOT (1994)	16
1.6.8.	Critère de Fuller et Hoy (1950)	18
1.6.9.	Critère de Hansen 1963 (ou critère de 80%)	18
1.6.10.	Critère parabole rectangle (PARECT)	19
1.6.10.1.	Etude de la fonction parabole-rectangle	19
1.6.10.2.	Propriétés de la fonction parabole-rectangle	21
1.6.10.3.	Programme Parect (parabole-rectangle)	22
1.6.11.	Critère de van der veen 1956 (ou critère exponentiel)	24
1.7.	Conclusion	25

Chapitre 2 : Etude bibliographique des critères de résistance latérale des pieux

2.1.	Introduction	26
2.2.	L'essai de chargement latéral	26
2.2.1	Principe des essais	26
2.2.2	Appareillage	28
2.2.3	Le système de réaction	30
2.3	Le système d'application de l'effort sur le pieu	30
2.3.1	Dispositif de mesurage	30
2.3.2	Incertitudes de mesurage	32
2.4	Mode opératoire	32
2.4.1	Préparation de l'essai	32
2.4.2	Préparation du pieu	34
2.4.3	Processus de déroulement de l'essai	35
2.5	Expression des résultats	36

2.6	Présentation des critères de la capacité portante	37
2.7	Conclusion	38

Chapitre 3 : Description de la base de données d’essais de chargement vertical des pieux

3.1	Introduction	39
3.2	Présentation de la base de données	39
3.2.1	Sites d’essais	42
3.3	Description d’un essai de chargement statique	42
3.4	Description des essais de chargement dans le sol multicouche	44
3.5	Description des essais de chargement dans un sol sableux	46
3.6	Description des essais de chargement dans un sol argileux	67
3.7	Conclusion	49

Chapitre 4 : Description de la base de données d’essais de chargement latéral des pieux

4.1	Introduction	50
4.2	Présentation de la base de données	50
4.2.1	Sites d’essais	53
4.3	Description des essais de chargement dans un sol multicouche	53
4.3.1	Matériau et le mode d’installation du pieu	54
4.3.2	La fiche et diamètre du pieu	54
4.3.3	Forme de la section des pieux	55
4.4	Description des essais de chargement dans un sol sableux	55
4.4.1	Matériau et le mode d’installation du pieu	56
4.4.2	La fiche et diamètre du pieu	56
4.4.3	Forme de la section des pieux	57
4.5	Description des essais de chargement dans un sol argileux	57
4.5.1	Matériau et le mode d’installation du pieu	58
4.5.2	La fiche et diamètre des pieux	58
4.5.3	Forme de la section des pieux	59
4.6	Description des essais de chargement dans le sol limoneux	59
4.6.1	Matériau et le mode d’installation du pieu	60

4.6.2	La fiche et diamètre du pieux	60
4.6.3	Forme de la section des pieux	61
4.7	Les Essais in situ utilisés	61
4.8	Conclusion	62

Chapitre 5 : Etude des critères de capacité portante des pieux.

5.1	Introduction	63
5.2.	Interprétation des courbes de chargement dans le sable	63
5.2.1.	Exemple d'Interprétation des courbes de chargement dans un sol sableux.....	63
5.3.	Interprétation des courbes de chargement dans l'argile	69
5.4.	Interprétation des courbes de chargement dans le sol multicouche	69
5.5.	Analyse statistique et classement des critères	73
5.5.1.	Présentation des histogrammes d'analyse statistique de chaque Critère	73
5.6	Analyse statistique et classement des critères dans le sable	74
5.6.1	La fréquence d'application des critères	74
5.6.2	Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante ...	74
5.6.3	Étude statistique du rapport de capacité portante	75
5.6.4	Classement général des critères de capacité portante	76
5.6.4.1	Classement des critères selon la fréquence d'application	76
5.6.4.2	Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude)	77
5.6.4.3	Classement des critères selon le coefficient de variation- COV - (précision)	78
5.6.4.4	Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la capacité portante (Np)	78
5.6.4.5	Classement général des critères de capacité portante	79
5.7	Analyse statistique et classement des critères dans l'argile	80
5.7.1	La fréquence d'application des critères	80
5.7.2	Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante ...	80
5.7.3	Étude statistique du rapport de capacité portante	81
5.7.4	Classement général des critères de capacité portante	82
5.7.4.1	Classement des critères selon la fréquence d'application	82
5.7.4.2	Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude)	82

5.7.4.3	Classement des critères selon le coefficient de variation-COV - (précision)	83
5.7.4.4	Classement des critères selon le niveau de prévision de la capacité portante (Np)	84
5.7.4.5	Classement général des critères de capacité portante	84
5.8	Analyse statistique et classement des critères dans sol multicouche	85
5.8.1	La fréquence d'application des critères	85
5.8.2	Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante ...	86
5.8.3	Étude statistique du rapport de capacité portante	86
5.8.4	Classement général des critères de capacité portante	91
5.8.4.1	Classement des critères selon la fréquence d'application	91
5.8.4.2	Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude)	91
5.8.4.3	Classement des critères selon l'écart type σ (précision)	92
5.8.4.4	Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la capacité portante (Np)	93
5.8.4.5	Classement général des critères de capacité portante	93
5.9	Conclusion	95

Chapitre 6 : Etude des critères de résistance latérale des pieux.

6.1	Introduction	96
6.2	Interprétation des courbes de chargement dans le sable	97
6.2.1	Exemple d'Interprétation des courbes de chargement dans un sol sableux.	97
6.2.2	Critère PARECT (parabole-rectangle)	100
6.2.2.1	Charge latérale limite (Hu)	100
6.2.2.2	Raideur latérale initiale	101
6.2.2.3	Déplacement de référence (y_{0R})	103
6.2	Interprétation des courbes de chargement dans l'argile	105
6.3	Interprétation des courbes de chargement dans le sol multicouche	108
6.4	Interprétation des courbes de chargement dans le limon	112
6.5	Analyse statistique et classement des critères dans le sable	113
6.5.1	La fréquence d'application des critères	113
6.5.2	Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante .	113
6.5.3	Étude statistique du rapport de capacité portante	114
6.5.4	Classement général des critères de capacité portante	117

6.5.4.1	Classement des critères selon la fréquence d'application	117
6.5.4.2	Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude)	118
6.5.4.3	Classement des critères selon l'écart type σ (précision)	118
6.5.4.4	Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la capacité portante (N_p)	119
6.5.4.5	Classement général des critères de capacité portante	119
6.6	Analyse statistique et classement des critères dans l'argile	120
6.6.1	La fréquence d'application des critères	120
6.6.2	Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante .	121
6.6.3	Étude statistique du rapport de capacité portante	121
6.6.4	Classement général des critères de capacité portante	124
6.6.4.1	Classement des critères selon la fréquence d'application	124
6.6.4.2	Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude)	125
6.6.4.3	Classement des critères selon l'écart type σ (précision)	125
6.6.4.4	Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la capacité portante (N_p)	126
6.6.4.5	Classement général des critères de capacité portante	126
6.7	Analyse statistique et classement des critères dans sol multicouche	127
6.7.1	La fréquence d'application des critères	127
6.7.2	Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portant ...	128
6.7.3	Étude statistique du rapport de capacité portante	128
6.7.4	Classement général des critères de capacité portante	131
6.7.4.1	Classement des critères selon la fréquence d'application	131
6.7.4.2	Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude)	132
6.7.4.3	Classement des critères selon l'écart type σ (précision)	132
6.7.4.4	Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la capacité portante (N_p)	133
6.7.4.5	Classement général des critères de capacité portante	133
6.8	Analyse statistique et classement des critères dans le limon	134
6.8.1	La fréquence d'application des critères	134
6.8.2	Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante .	135
6.8.3	Étude statistique du rapport de capacité portante	135
6.8.4	Classement général des critères de capacité portante	137
6.9	Conclusion	137

CONCLUSION GENERALE	138
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	139
LES ANNEXE :	
 Annexe I : Résultat de critère PARECT	145
 Annexe II : Les caractéristiques géométriques de la base des données d'essais de chargement latéral des pieux	195
 Annexe III : Les courbes de chargement latéral	202

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01 :

Figure 1.1 : Dispositif de chargement et de mesure pour essai de pieu (schéma de principe).....	02
Figure 1.2 : courbe charge –tassement en tête du pieu sous un effort axial de compression.....	03
Figure 1.3 : Système de chargement avec bloc	06
Figure 1.4 : Système de chargement avec pieux de réactions	07
Figure 1.5 : Schéma d’un essai avec le système O-Cell (Melvin, 2010)	08
Figure 1.6 : Effet de l’échelle lors du dessin de la courbe charge déplacement d’après van der Veen (cité par Sanglerat, 1982)	10
Figure 1.7 : Interprétation selon le critère 10 % de B	12
Figure 1.8 : Interprétation selon le critère de Bulter et Hoy (1977)	13
Figure 1.9 : Interprétation selon le critère de Chin (hyperbolique)	14
Figure 1.10 : Interprétation selon le critère de Davisson (1972)	15
Figure 1.11 : Interprétation selon le critère De Beer	15
Figure 1.12 : Interprétation selon le critère de Décourt (1999)	16
Figure 1.13 : Interprétation selon le critère FDOT	17
Figure 1.14 : Interprétation selon le critère de Fuller et Hoy (1950)	18
Figure 1.15 : Interprétation selon le critère de Hansen (1963)	19
Figure 1.16 : Courbe de la fonction polynôme	19
Figure 1.17 : Représentation des Comportement	21
Figure 1.18 : Courbe de la fonction Parabole-rectangle	21
Figure 1.19 : La fonction impaire de PARECT	22

Figure 1.20 : Interprétation selon le critère de Van der Veen	25
--	----

Chapitre 02 :

Figure 2.1 : Principe de l'essai statique de pieu isolé sous effort transversal	26
Figure 2.2 : Programme de chargement-déchargement par palier	27
Figure 2.3 : Courbe effort-déplacement transversal du pieu en tête	27
Figure 2.4 : Pieu soumis à un effort transversal — Courbes types	28
Figure 2.5 : Appareillage de l'essai statique sous effort transversal — Principe	29

Chapitre 03 :

Figure 3.1 : répartition géographique des sites expérimentaux	40
Figure 3.2 : Distribution en histogramme des essais de chargement selon la nature de sol.....	42
Figure 3.3 : Massif de réaction	43
Figure 3.4 : Vérin hydraulique	43
Figure 3.5 : Jauge de mesure	44
Figure 3.6 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol multicouche)....	44
Figure 3.7 : Distribution en pourcentage Le mode de mise en place du pieu	44
Figure 3.8 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol multicouche)	45
Figure 3.9 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol multicouche)	45
Figure 3.10 : Distribution en pourcentage selon le type de l'essai In-situ (sol multicouche).....	45
Figure 3.11 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol sableux)	46
Figure 3.12 : Distribution en pourcentage Le mode de mise en place du pieu	46
Figure 3.13 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol sableux)	46

Figure 3.14: Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol sableux)	46
Figure 3.15 : Distribution en pourcentage selon le type de l'essai In-situ (sol sableux) ...	47
Figure 3.16 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol argileux)	47
Figure 3.17 : Distribution en pourcentage Le mode de mise en place du pieu	47
Figure 3.18 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol argileux)	48
Figure 3.19: Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol argileux)	48
Figure 3.20 : Distribution en pourcentage selon le type de l'essai In-situ (sol argileux)...	48

Chapitre 04 :

Figure 4.1 : Répartition géographique des sites expérimentaux	51
Figure 4.2 : Distribution en histogramme des essais de chargement selon la nature de sol.....	53
Figure 4.3 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol multicouche)	54
Figure 4.4 : Distribution en pourcentage Selon Le mode d'installation du pieu	54
Figure 4.5 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol multicouche)	54
Figure 4.6: Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol multicouche)	54
Figure 4.7 : Distribution en pourcentage des pieux selon la forme géométrique de leurs sections (sol multicouche)	55
Figure 4.8: Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol sableux)	56
Figure 4.9: Distribution en pourcentage Le mode d'installation du pieu	56
Figure 4.10 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol sableux)	56
Figure 4.11: Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol sableux)	56
Figure 4.12 : Distribution en pourcentage des pieux selon la forme géométrique de leurs sections (sol sableux)	57
Figure 4.13 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol argileux)	58

Figure 4.14 : Distribution en pourcentage Le mode d'installation du pieu	58
Figure 4.15 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (sol argileux)	58
Figure 4.16 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (sol argileux)	58
Figure 4.17 : Distribution en pourcentage des pieux selon la forme géométrique de leurs sections (sol argileux)	59
Figure 4.18 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol limoneux)	60
Figure 4.19 : Distribution en pourcentage Le mode d'installation du pieu	60
Figure 4.20 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (sol limoneux)	60
Figure 4.21 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (sol limoneux)	60
Figure 4.22 : Distribution en pourcentage des pieux selon la forme géométrique de leurs sections (sol limoneux)	61

Chapitre 05 :

Figure 5.1 : Courbe charge-tassement (Sable)	65
Figure 5.2 : Critère de Hansen (sable)	65
Figure 5.3 : Critère de Davisson (sable)	65
Figure 5.4 : Critère de Décourt (sable)	65
Figure 5.5 : Critère de FDOT (sable)	65
Figure 5.6 : Critère de PARECT (sable)	66
Figure 5.7 : Critère d'hyperbolique (sable)	66
Figure 5.8 : Critère de Bulter et Hoy (sable)	66
Figure 5.9 : Critère de Van der Veen (sable)	66
Figure 5.10 : Critère de 10 % B (sable)	66
Figure 5.11 : Critère de beer (sable)	66

Figure 5.12 : Schéma représentatif par la fonction de probabilité de gauss	73
Figure 5.13 : Critère de 10% de B (Multicouche)	88
Figure 5.14 : Critère de Bulter et Hoy (Multicouche)	88
Figure 5.15 : Critère de Davisson (Multicouche)	89
Figure 5.16 : Critère de De Beer (Multicouche)	89
Figure 5.17 : Figure 5.50 : Critère de Décourt (Multicouche)	89
Figure 5.18 : Critère de Fuller et Hoy(Multicouche)	89
Figure 5.19 : Critère de Hansen(Multicouche)	90
Figure 5.20 : Critère Hyperbolique (Multicouche)	90
Figure 5.21 : Critère de PARECT(Multicouche)	90
Figure 5.22 : Critère de Van der veen (Multicouche)	90

Chapitre 06 :

Figure 6.1 : Courbe charge-tassement (Sable)	98
Figure 6.2 : Critère de Décourt (sable)	98
Figure 6.3 : Critère de PARECT (sable)	98
Figure 6.4 : Critère de 10 % B (sable)	98
Figure 6.5 : Critère de Van der Veen (sable)	98
Figure 6.6 : Critère de beer (sable)	99
Figure 6.7 : Critère d'hyperbolique (sable)	99
Figure 6.8 : Courbe normalisée de chargement horizontal d'un pieu	103
Figure 6.9 : Critère de De beer (sable)	116
Figure 6.10 : Critère de Décourt (sable)	116

Figure 6.11 : Critère Hyperbolique (sable)	116
Figure 6.12 : Critère PARECT (sable)	117
Figure 6.13 : Critère Van der veen (sable)	117
Figure 6.14 : Critère de 10 % de B (argile)	123
Figure 6.15 : Critère de Décourt (argile)	123
Figure 6.16 : Critère de PARECT (argile)	124
Figure 6.17 : Critère de Décourt (argile)	130
Figure 6.18 : Critère Hyperbolique (argile)	130
Figure 6.19 : Critère PARECT (argile)	131
Figure 6.20 : Critère Van der veen (argile)	131

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01 :

Tableau 1.1 : Record de charge ultime d'essai O-cell réalisé par l'entreprise FUGRO (Melvin, 2010)	09
---	----

Chapitre 02 :

Aucun tableau

Chapitre 03 :

Tableau 3.1 : Pays des essais de charge latéral sur pieux collectés	41
Tableau 3.2 : de longueurs de cas et nombre de cas dans le sol multicouche sable et l'argile	41

Chapitre 04 :

Tableau 4.1 : Pays des essais de charge latéral sur pieux collectés	52
Tableau 4.2 : Gamme de longueurs de cas et nombre de cas dans le sol multicouche Sable, l'argile et limon	52
Tableau 4.3 : Essais in situ réalisés classer selon la nature du sol des sites expérimentaux.....	61

Chapitre 05 :

Tableau 5.1 : L'essai de chargement statique vertical (sable)	64
Tableau 5.2 : Résultats de capacité portante verticale d'un seul pieu en kN (sable)	67
Tableau 5.3 : Résultats de capacité portante verticale en kN (sable)	68
Tableau 5.4 : Résultats de capacité portante verticale en kN (argile)	69
Tableau 5.5 : Résultats de capacité portante verticale en kN (multicouche)	70
Tableau 5.6 : Résultats de la fréquence d'application des critères (sable)	74

Tableau 5.7 : Répartition des valeurs de λ (sable)	75
Tableau 5.8 : Les résultats de l'étude statistique de λ (sable)	76
Tableau 5.9 : Classement des critères selon la fréquence d'application (sable)	77
Tableau 5.10 : Classement des critères selon la moyenne μ (sable)	77
Tableau 5.11 : Classement des critères selon le coefficient de variation (sable)	78
Tableau 5.12 : Classement selon le niveau de prévision (sable)	79
Tableau 5.13 : Classement général des critères (sable)	79
Tableau 5.14 : Résultats de la fréquence d'application des critères (argile)	80
Tableau 5.15 : Répartition des valeurs de λ (argile)	80
Tableau 5.16 : Les résultats de l'étude statistique de λ (argile)	81
Tableau 5.17 : Classement des critères selon la fréquence d'application (argile)	82
Tableau 5.18 : Classement des critères selon la moyenne μ (argile)	83
Tableau 5.19 : Classement des critères selon le coefficient de variation (argile)	83
Tableau 5.20 : Classement selon le niveau de prévision (argile)	84
Tableau 5.21 : Classement général des critères (argile)	85
Tableau 5.22 : Résultats de la fréquence d'application des critères (multicouche)	85
Tableau 5.23 : Répartition des valeurs de λ (multicouche)	86
Tableau 5.24 : Les résultats de l'étude statistique de λ (multicouche)	87
Tableau 5.25 : Résultats des paramètres statistiques (multicouche)	87
Tableau 5.26 : Classement des critères selon la fréquence d'application (multicouche) ..	91
Tableau 5.27 : Classement des critères selon la moyenne μ (multicouche)	92
Tableau 5.28 : Classement des critères selon l'écart type (multicouche)	92

Tableau 5.29 : Classement selon le niveau de prévision (multicouche)	93
Tableau 5.30 : Classement général des critères (multicouche)	94

Chapitre 06 :

Tableau 6.1 : L'essai de chargement statique vertical (sable)	97
Tableau 6.2 : Résultats de résistance latérale d'un seul pieu en kN (sable)	99
Tableau 6.3 : Charge latérale limite dans le sable	100
Tableau 6.4 : Raideur latérale initiale dans le sable	102
Tableau 6.5 : Déplacement de référence dans le sable	104
Tableau 6.6 : Charge latérale limite dans l'argile	105
Tableau 6.7 : Raideur latérale initiale dans l'argile	106
Tableau 6.8 : Déplacement de référence dans l'argile	107
Tableau 6.9 : Charge latérale limite dans le sol multicouche	108
Tableau 6.10 : Raideur latérale initiale dans le sol multicouche	110
Tableau 6.11 : Déplacement de référence dans le sol multicouche	111
Tableau 6.12 : Charge latérale limite dans le limon	112
Tableau 6.13 : Raideur latérale initiale dans le limon	112
Tableau 6.14 : Déplacement de référence dans le limon	113
Tableau 6.15 : Résultats de la fréquence d'application des critères (sable)	113
Tableau 6.16 : Répartition des valeurs de λ (sable)	114
Tableau 6.17 : Les résultats de l'étude statistique de λ (sable)	114
Tableau 6.18 : Résultats des paramètres statistiques (sable)	115
Tableau 6.19 : Classement des critères selon la fréquence d'application (sable)	117
Tableau 6.20 : Classement des critères selon la moyenne μ (sable)	118

Tableau 6.21 : Classement des critères selon l'écart type (sable)	118
Tableau 6.22 : Classement selon le niveau de prévision (sable)	119
Tableau 6.23 : Classement général des critères (sable)	120
Tableau 6.24 : Résultats de la fréquence d'application des critères (argile)	120
Tableau 6.25 : Répartition des valeurs de λ (argile)	121
Tableau 6.26 : Les résultats de l'étude statistique de λ (argile)	122
Tableau 6.27 : Résultats des paramètres statistiques (argile)	122
Tableau 6.28 : Classement des critères selon la fréquence d'application (argile)	124
Tableau 6.29 : Classement des critères selon la moyenne μ (argile)	125
Tableau 6.30 : Classement des critères selon l'écart type (argile)	125
Tableau 6.31 : Classement selon le niveau de prévision (argile)	126
Tableau 6.32 : Classement général des critères (argile)	127
Tableau 6.33 : Résultats de la fréquence d'application des critères (multicouche)	127
Tableau 6.34 : Répartition des valeurs de λ (multicouche)	128
Tableau 6.35 : Les résultats de l'étude statistique de λ (multicouche)	129
Tableau 6.36 : Résultats des paramètres statistiques (multicouche)	129
Tableau 6.37 : Classement des critères selon la fréquence d'application (multicouche)	131
Tableau 6.38 : Classement des critères selon la moyenne μ (multicouche)	132
Tableau 6.39 : Classement des critères selon l'écart type (multicouche)	132
Tableau 6.40 : Classement selon le niveau de prévision (multicouche)	133
Tableau 6.41 : Classement général des critères (multicouche)	134
Tableau 6.42 : Résultats de la fréquence d'application des critères (limon)	134
Tableau 6.43 : Répartition des valeurs de λ (limon)	135

Tableau 6.44 : Les résultats de l'étude statistique de λ (limon) 136

Tableau 6.45 : Résultats des paramètres statistiques (limon) 136

LISTE DES SYMBOLES

Q_L : La capacité portante vertical de pieu.

Q_s : La résistance de frottement axial (kN).

S : Surface de pieu (m²).

P : Périmètre de pieu (m).

PMT : Essai pressiométrique.

CPT : Essai de pénétromètre statique.

SPT : Essai pénétration standard.

D : Fiche de pieu (m).

B : Diamètre de pieu (m).

H : effort latéral (kN).

H_u : effort latéral ultime (kN).

Q : La charge appliquée (KN).

V₀ : Tassement en tête de pieux (mm).

b : Pente de la ligne droite.

E_p : Module de Young (ou le module élastique) (MPa).

L : Longueur de pieu (m).

k_v : Raideur sécante du pieu (force/tassement).

k_{v0} : Raideur verticale initiale du pieu.

V_{0R} : Tassement résiduel (rupture).

Q_{I moyenne} : La moyenne arithmétique de capacité portante pour un pieu donné.

COV : Coefficient de variation.

λ : Rapport de capacité portante et résistance latérale.

λ_{moyenne} : La moyenne arithmétique de rapport de capacité portante pour un pieu donné.

μ : La moyenne.

σ : L'écart-type.

R : coefficient de régression (%).

MG : Moment gravitaire

NA : non applicable.

INTRODUCTION GENERALE

Les fondations forment un élément essentiel dans un ouvrage, et comportant plusieurs types, entre autres des fondations profondes ou les pieux, des essais dans le terrain sont menées sur les pieux pour mesurer leur capacité portante. Parmi ces essais figurent les essais de chargement.

Dans ce projet de fin d'étude, l'analyse et l'interprétation des résultats des essais de chargement ont été analysées, comprenant 50 essais de chargement vertical et 123 essai de chargement horizontal.

Ce travail a été divisé en six chapitres. Le premier est réservé à l'étude bibliographique qui explique brièvement les essais de chargement vertical. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique qui explique l'essai de chargement horizontal et son système d'application.

Le troisième chapitre est consacré à la description de la base de données d'essais de chargement vertical des pieux. Le quatrième chapitre concerne la description des essais de chargement horizontal des pieux qui sont regroupés dans une base de données.

Le cinquième chapitre est consacré à interpréter et analyser les résultats des essais de chargement vertical, en appliquant des critères en vue d'estimer la capacité portante Q_L et en comparant ces critères. En fin, le sixième chapitre est réservé à l'interprétation et l'analyse les résultats des essais de chargement horizontal en appliquant des critères en vue d'estimer la résistance latérale du pieu H_u .

Par la suite, ces critères sont comparés et classés selon l'exactitude, la précision et le niveau de prévision.

Chapitre

01

*Étude bibliographique des
critères de capacité portante
des pieux*

1. Essais de chargement vertical des pieux in-situ :

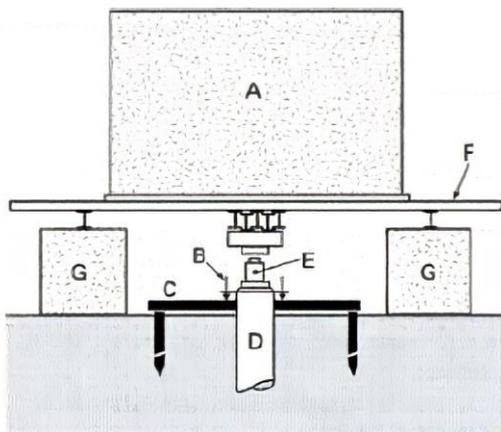
1.1. Introduction :

L'estimation de la force portante d'un pieu sous un chargement vertical est basée sur les résultats d'investigations géotechniques du site (les essais de laboratoire et les essais in-situ). Toutefois, cette estimation doit être validée par un essai de chargement sur un ou plusieurs pieux in-situ. Dans la pratique, ces essais de chargement sont réalisés selon deux alternatives (Prakash & Sharma, 1990) :

- Durant la phase d'étude, l'essai de chargement est effectué pour raffiner et finaliser le dimensionnement du pieu. Dans ce cas de figure, l'essai est conduit jusqu'à la rupture,
- Essai sur les pieux du projet, l'essai de chargement est effectué sur des pieux du projet choisis arbitrairement afin de vérifier le dimensionnement des pieux. Pour ce type d'essai, les pieux sont chargés à deux fois la charge en service.

1.2. Principe de l'essais et l'appareillage :

L'essai de chargement statique consiste à appliquer en tête d'un pieu, par paliers maintenus constants, un effort axial de compression selon un programme défini, ensuite mesurer le déplacement axial de la tête du pieu.



A	massif de réaction	E	vérin
B	comparateur	F	platelage rigide
C	base de mesure (base fixe)	G	camardeaux
D	pieu d'essai		

Figure 1.1 : Dispositif de chargement et de mesure pour essai de pieu (schéma de principe).

L'essai est pour but de déterminer directement la courbe charge-tassement du pieu et déduire après les charges limites Q_l et de fluage Q_c et, par suite, la charge admissible sur le pieu.

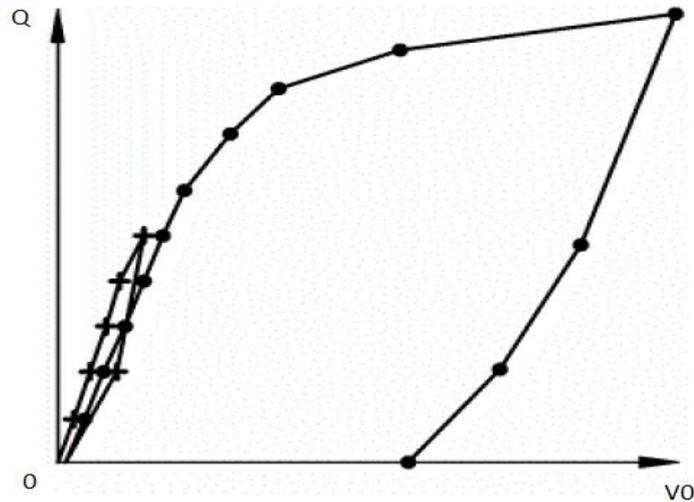


Figure 1.2 : courbe charge –tassement en tête du pieu sous un effort axial de compression.

Légende :

- Q : charge en tête du pieu.
- v_0 : déplacement du pieu en tête.

1.3. Procédures de chargement des pieux :

1.3.1. Procédure Lente (Slow Maintained Load Test):

Cette procédure est recommandée par l'ASTM D1143-81(1989). L'essai de chargement est effectué comme suit :

- Charger le pieu jusqu'à deux fois la charge de service selon huit incréments de charge (25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175% et 200%) en maintenant chaque palier de chargement jusqu'à ce que la vitesse du tassement soit inférieure à 0.25mm/h sans dépasser deux heures de temps.
- Laisser le pieu sous deux fois la charge de service pendant 24h.
- Décharger le pieu avec des décréments de 25%. La durée de chaque décrétement de charge est une heure.

- Recharger le pieu jusqu'à deux fois la charge de service avec des incréments de 50%. La durée de chaque incréments de charge est 20min.
- Si la rupture du pieu ne s'est pas produite à la fin de l'étape précédente, augmenter la charge avec des incréments de 10% maintenu pendant 20min chacun jusqu'à atteindre la rupture.

Cette procédure est communément considérée comme étant l'essai standard de l'ASTM, elle est généralement utilisée pour l'investigation du site avant l'établissement du contrat et l'écriture des spécifications. L'inconvénient de cette procédure c'est qu'elle consomme beaucoup de temps (un essai peut durer entre 40 et 70 heures ou plus) (Prakash & Sharma, 1990) [6].

1.3.2. Procédure rapide (Quick Maintained Load Test):

Cette procédure est recommandée par le département de transport de l'état de New York, l'administration fédérale des autoroutes des Etats Unis et l'ASTM 1143-81(1989). Les étapes de cette procédure sont :

- Charger le pieu jusqu'à trois fois la charge de service avec des incréments de charge de 15%, en maintenant chaque incréments de charge pendant 5min tout en prenant des lectures chaque 2.5min,
- Ajouter des incréments de charge jusqu'à la capacité maximale des vérins hydrauliques ou la limite du système de réaction,
- Après 5min d'intervalle, décharger le pieu suivant quatre paliers de déchargement en respectant 5min de temps entre chaque palier.

Cette procédure est plus rapide et plus économique, l'essai de chargement peut durer entre 3 à 5 heures. Cette méthode représente le comportement non drainé du sol (Prakash & Sharma, 1990) [6].

1.3.3. Procédure avec un taux constant d'enfoncement (Constant Rate of Pénétration Test) :

Cette procédure est recommandée par la commission suédoise des pieux, le département de transport de l'état de New York et l'ASTM D1143-81(1989). Les étapes de cette procédure sont :

- Charger le pieu jusqu'à ce que la vitesse du tassement soit égale à 1.25mm/min,
- La charge qui a permis d'avoir ce taux d'enfoncement est enregistré
- L'essai est poursuivi jusqu'à un enfoncement total de 50 à 75mm.

Cette procédure est rapide (elle dure entre 2 à 3h) et économique. Elle est pratique pour les pieux flottant mais elle n'est pas pratique pour les pieux travaillant en pointe car il faudrait appliquer une force importante pour pouvoir enfoncer le pieu dans une couche relativement dure (Prakash & Sharma, 1990) [6].

1.3.4. Procédure de la norme NF P 94-150-1(1999) :

La procédure de l'essai est comme suit :

- Charger le pieu jusqu'à 50% de la charge limite de l'essai avec des incréments de 10% en maintenant chaque palier pendant une durée de 60min.
- Décharger le pieu avec des décréments de 20% de la charge de l'essai, la durée de chaque décrétement est de 5min.
- Recharger le pieu avec des incréments de 10% maintenu pendant 30min jusqu'à atteindre 50% de la charge de l'essai. Continuer le chargement avec le même incrétement de charge jusqu'à la charge maximale de l'essai (Q_{max}) ou jusqu'à la rupture en respectant une durée de 60min pour chaque incrétement de charge.
- Décharger le pieu avec des décréments de 20% de la charge de l'essai maintenu pendant 5min chacun [6].

1.4. Systèmes de chargement vertical :

Les systèmes de chargement vertical généralement utilisés sont le système de bloc « kenteledge bloc », le système de pieux de réactions et le système O-cell (cellule d'Osterberg).

1.4.1. Système de bloc « Kenteledge » :

Ce système consiste à utiliser des blocs qui sont supportés par un plateau en acier lequel s'appuie sur des supports qui sont généralement en béton, la distance entre ces supports et le pieu doit être supérieure ou égale à trois fois le diamètre du pieu afin de réduire leurs influences sur les résultats de l'essai.

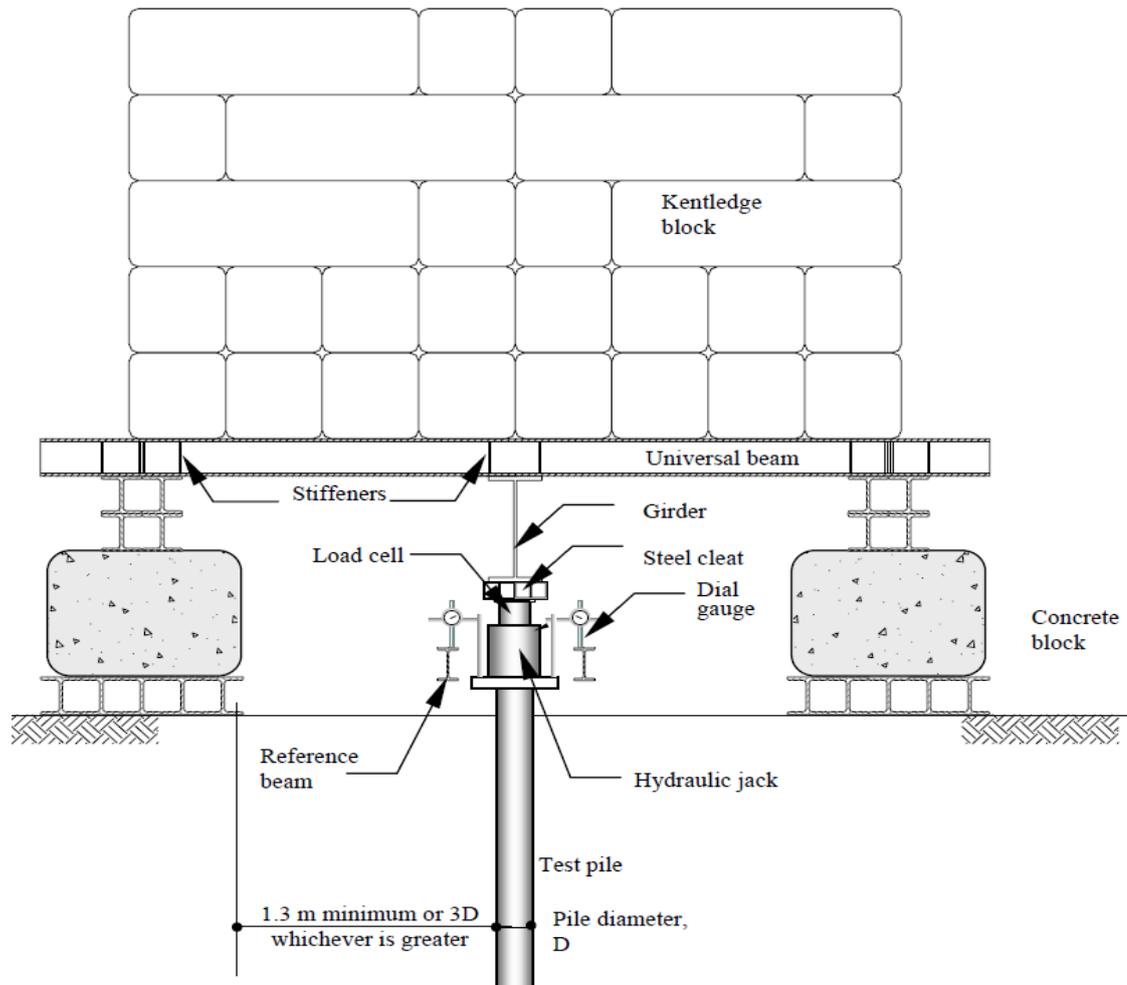


Figure 1.3 : Système de chargement avec bloc [6].

1.4.2. Système avec pieux de réactions :

Dans ce système, la réaction de la charge appliquée sur le pieu d'essai est reprise par des pieux de réaction qui sont sollicités en traction.

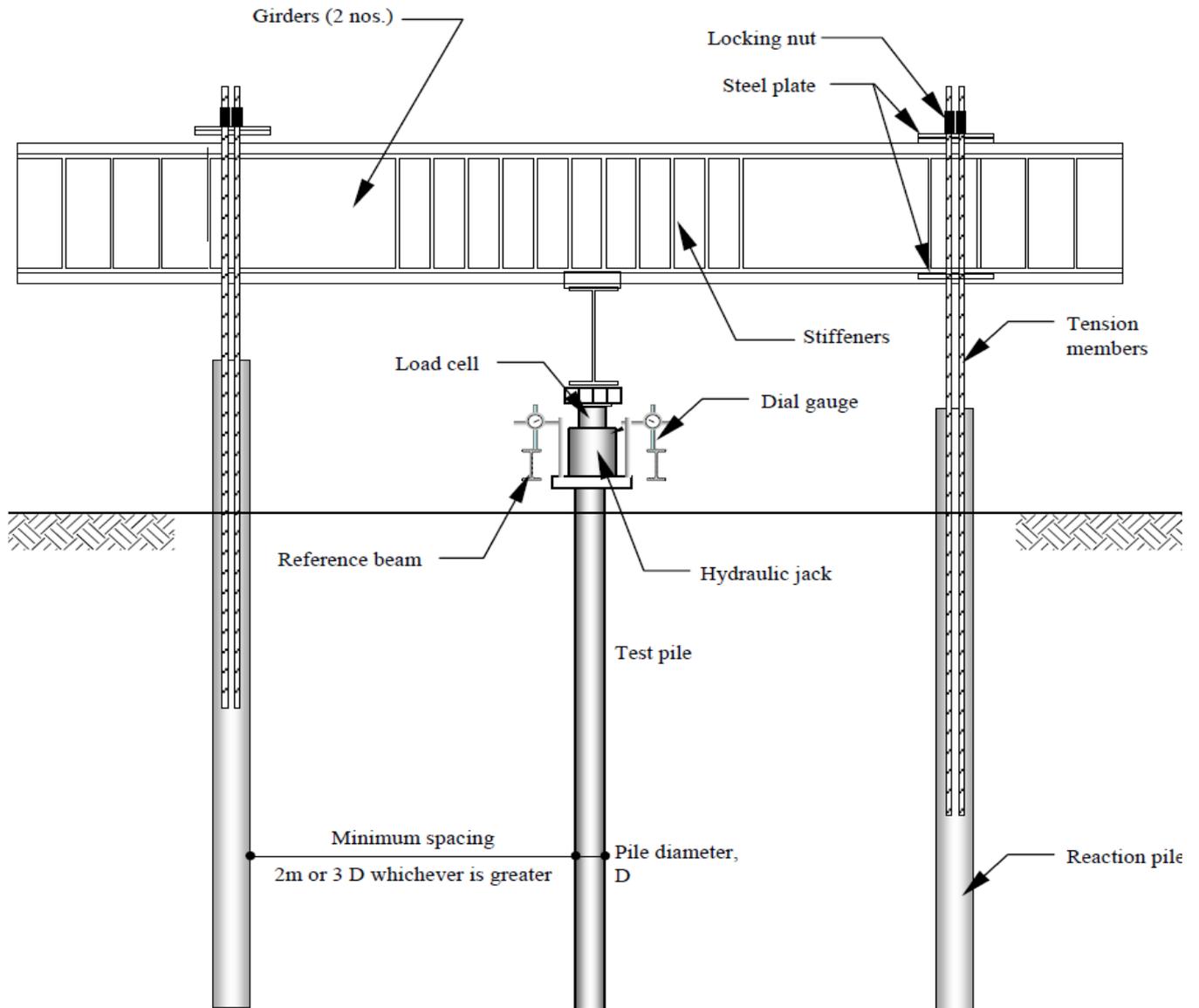


Figure 1.4 : Système de chargement avec pieux de réactions [6].

1.4.3. Système O-Cell :

Ce système consiste à incorporer une cellule de chargement au milieu ou en pointe du pieu. L'avantage de système de chargement est qu'on n'a pas besoin d'un système pour reprendre la réaction de la charge appliquée sur le pieu et on peut atteindre des charges importantes (tableau 1.1) en combinant plusieurs cellules à la fois. Il a été créé par Osterberg d'où le nom Osterberg cell test ou O-Cell test.

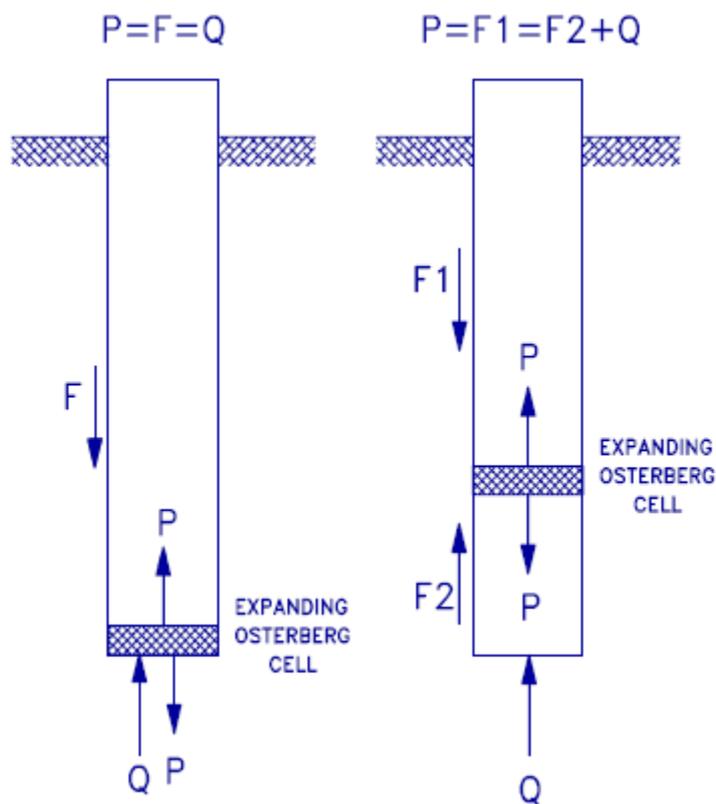


Figure 1.5 : Schéma d'un essai avec le système O-Cell (Melvin, 2010)

Tableau 1.1 : Record de charge ultime d'essai O-cell réalisé par l'entreprise FUGRO (Melvin, 2010).

Location	Diameter	Depth	Maximum Load
Ohio River Bridge, Kentucky (1992)	1.8m (6 ft.)	36m (117 ft.)	54 MN (6,200 tons)
St. Mary's River, Georgia (1996)	1.5m (5 ft.)	23m (75 ft.)	65 MN (7,300 tons)
Penang, Malaysia (1996)	6x1m barrette	91m (300 ft.)	97 MN (11,000 tons)
Apalachicola River, Florida (1997)	2.75m (9 ft.)	39m (127 ft.)	133 MN (15,000 tons)
Tucson, Arizona (2001)	2.4m (7.9 ft.)	41m (135 ft.)	151 MN (17,000 tons)
Pomeroy - Mason WV, Ohio River	2.4m (8 ft.)	26m (86ft.)	163 MN (18,400 tons)
Incheon 2 nd Crossing Korea	2.4m – 3.0m (8 ft. – 10ft.)	67m (220ft.)	279 MN (31,350 tons)

1.5. Interprétation d'essai de chargement vertical :

L'essai de chargement vertical sur un pieu instrumenté permet de déterminer la charge ultime du pieu « Q_u » et le frottement latéral unitaire mobilisé toute au long du pieu « q_s ». Ces deux résultats sont déduits de la courbe charge-déplacement et des jauges de déformations respectivement.

1.5.1. Détermination de la charge ultime Q_u :

Poulos (1980), avait donné deux définitions de la charge ultime du pieu :

- La charge sous laquelle le déplacement continue d'augmenter sans une augmentation de cette dernière (plongement du pieu) (Civil Engineering Code of Practice No 4, 1954).
- La charge qui provoque un déplacement de la tête du pieu égale à 10% du diamètre du pieu (Terzaghi, 1942).

Le plongement de la courbe requière une charge très importante pour être atteint alors que lors de l'essai on est limité par la capacité du système de chargement. Tandis que la

deuxième définition néglige l'effet des déformations élastiques du pieu qui peuvent être important dans le cas d'un pieu long (Fellenius, 1990).

Généralement, la charge ultime est définie comme étant la charge correspondante au point d'intersection de la portion pseudo élastique avec la portion pseudo plastique de la courbe charge déplacement. Cependant, cette définition est étroitement liée à l'échelle du graphe (Sanglerat, 1982) (figure 1.6).

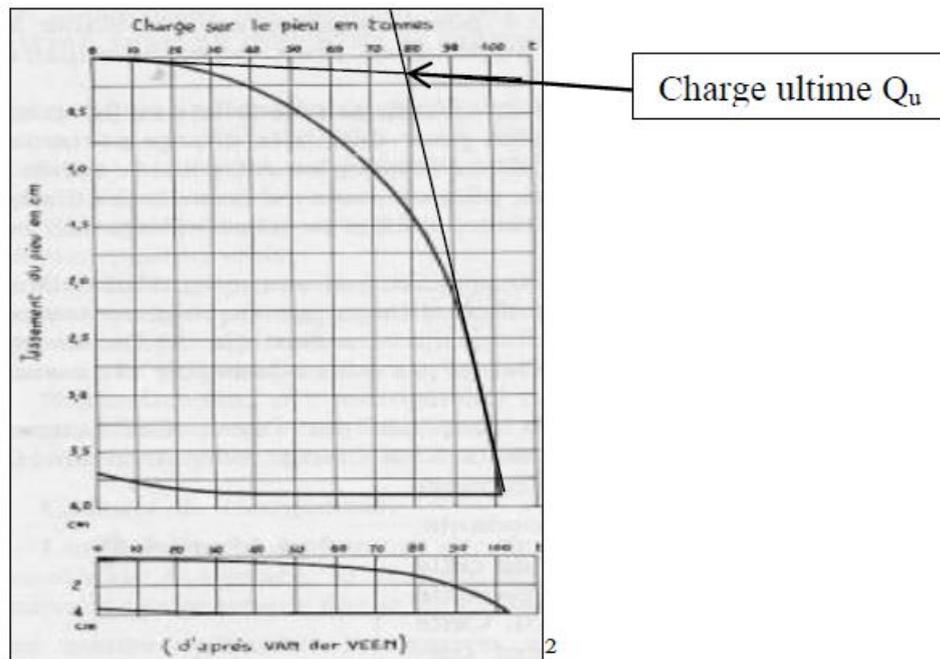


Figure 1.6 : Effet de l'échelle lors du dessin de la courbe charge déplacement d'après van der Veen (cité par Sanglerat, 1982).

La meilleure définition de la charge ultime doit être basée sur des règles mathématiques et générer des valeurs répétables qui sont indépendantes de l'échelle du dessin et de l'interprétation de l'individu (Fellenius, 1990).

Plusieurs méthodes ont été proposées pour définir la charge ultime du pieu à partir de l'essai de chargement vertical, parmi ces méthodes on peut citer :

- Méthode Van der Veen (1953).
- Méthode de Brinch Hansen 80 % (1963).
- Méthode de Brinch Hansen 90% (1963).
- Méthode de De Beer (1967).

- Méthode de Fuller & Hoy (1970).
- Méthode de Chin-Kondner (1970, 1971).
- Méthode de Davisson (1972).
- Méthode de Mazurkiewicz (1972).
- Méthode de Butler & Hoy (1977).
- Méthode de F. Ahmed & al (1997).
- Méthode d'extrapolation de Decourt (2000).
- La méthode de Dewaiker & Joshi (2000).
- La méthode de Paikowsky & Toiosko (1999).

Ces méthodes ont été élaborées pour les essais de chargement ayant atteint la rupture, à l'exception de la méthode de Dewaiker & Joshi (2000) et la méthode de Paikowsky & Toiosko (1999) qui ont été élaborées pour déterminer la charge ultime des pieux dans le cas où l'essai n'a pas atteint la rupture [7].

1.6. Présentation des critères de la capacité portante :

Dans le cas d'un pieu d'essai instrumenté seulement par des comparateurs pour la mesure du tassement, et par un capteur de force, on obtient seulement une courbe de chargement en fonction du tassement global (en tête) du pieu, et l'évaluation séparée de la résistance en pointe et du frottement latéral le long de fût n'est pas possible, l'interprétation de cette courbe de chargement se fait à l'aide de critères empiriques ou semi empiriques pour l'estimation globale de la charge verticale limite des pieux.

- Nous présentons quelques méthodes d'entre elles plus bas :

1.6.1. Critère conventionnel (10% de b) :

Une ancienne définition de la capacité portante a été proposé par Terzaghi :

- la capacité portante vertical pour laquelle le tassement de la tête de pieu dépasse une certaine valeur, généralement 10 % de diamètre de pieu.

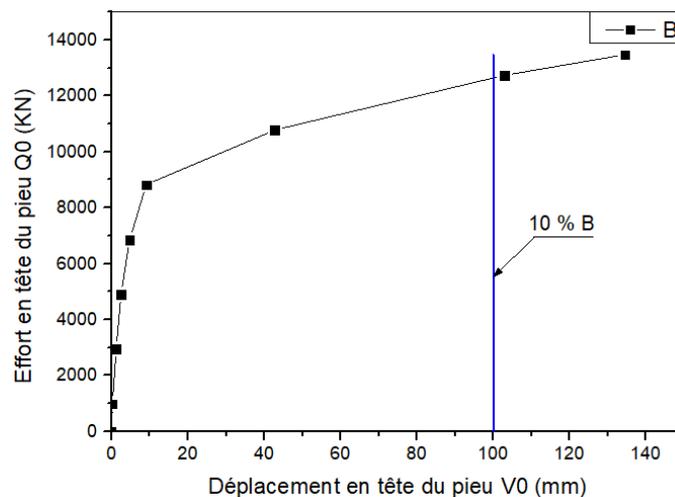


Figure 1.7 : Interprétation selon le critère 10 % de B.

1.6.2. Critère de Bulter et Hoy (1977) (ou critère de la tangente) :

Butler & Hoy (1977) ont constaté que la méthode de Fuller & Hoy sous-estime la charge ultime des pieux longs. Pour y remédier, ils ont proposé de tracer une autre droite tangente à la partie élastique de la courbe charge-déplacement afin de tenir compte du déplacement élastique du pieu qui peut être important dans les pieux longs (Fellenius, 1990).

D'où, ils ont défini la charge ultime par le point d'intersection de la droite tangente à la partie pseudo-élastique de la courbe charge-déplacement avec la droite de pente (7 KN/mm) tangente à la partie pseudo-plastique de la même courbe (figure 1.8).

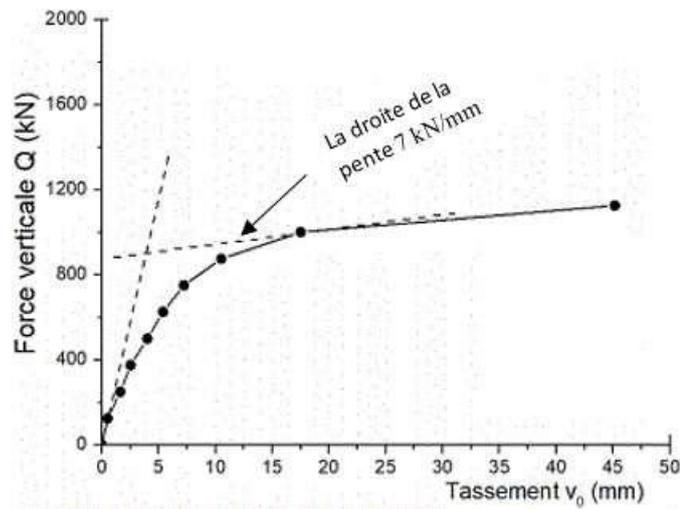


Figure 1.8 : Interprétation selon le critère de Bulter et Hoy (1977).

1.6.3. Critère d'hyperbolique :

La méthode graphique est proposée par Chin (1970-1971), en appliquant les travaux de Kondner (1963) sur la fonction hyperbolique. Chin suppose que la relation entre la charge et le tassement est hyperbolique.

L'application de ce critère est comme suivie (voir figure 1.9).

- Tracer la courbe v_0/Q en fonction de v_0 .
- Ajuster l'allure linéaire par une droite $a+bv_0$ par la méthode des moindres carrés.

La charge verticale limite est donnée par la formule suivante :

$$Ql = \frac{1}{b} \quad (1.1)$$

Avec :

b : Pente de la ligne droite.

En effet, on $Ql = \frac{V_0}{a + bV_0}$ donc $\frac{V_0}{Ql} = a + bV_0$ (1.2)

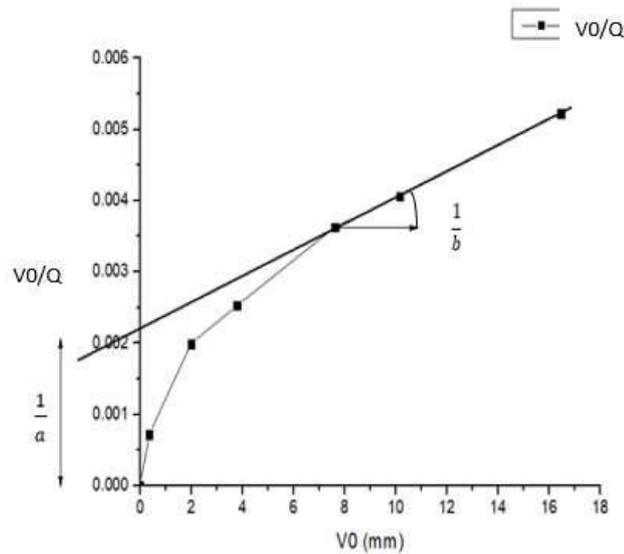


Figure 1.9 : Interprétation selon le critère de Chin (hyperbolique).

1.6.4. Critère de Davisson (1972) (ou critère de la valeur limite) :

Ce critère définit la charge limite comme la charge correspondant au tassement qui dépasse la compression élastique du pieu d'une valeur de 0.15 pouces (4 mm) en plus d'un facteur égal au diamètre du pieu divisé par 120 [23].

La procédure de cette méthode est la suivante :

- Tracer la courbe Q en fonction de v_0 .
- Tracer la droite de compression élastique de pieu, passant par l'origine et de pente égale à $\pi \cdot B \cdot E_p / 4L$.

Avec :

B : Le diamètre de pieu.

E_p : Module de Young (ou le module élastique).

L : Longueur de pieu.

- Tracer la droite parallèle à la droite de compression élastique, à une distance de x où $x = 3.75 + B/120$, le diamètre B étant en mm.

La charge verticale limite de pieu, correspondant à l'intersection de la droite translatée avec la courbe de chargement (voir la figure 1.10).

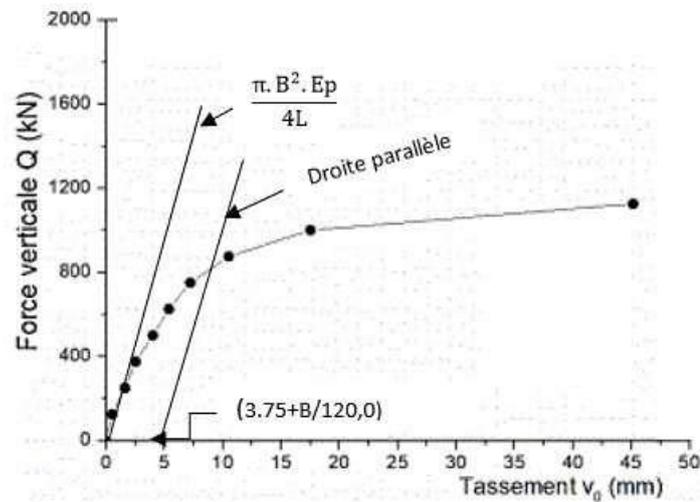


Figure 1.10 : Interprétation selon le critère de Davisson (1972).

1.6.5. Critère de de beer 1968 (ou critère bi-logarithmique) :

Cette méthode consiste à tracer la courbe chargement-déplacement dans une échelle bi logarithmique.

Cette courbe dégage deux lignes droites interconnectées, le point d'intersection de ces deux droites donne la charge verticale limite (voir la figure 1.11).

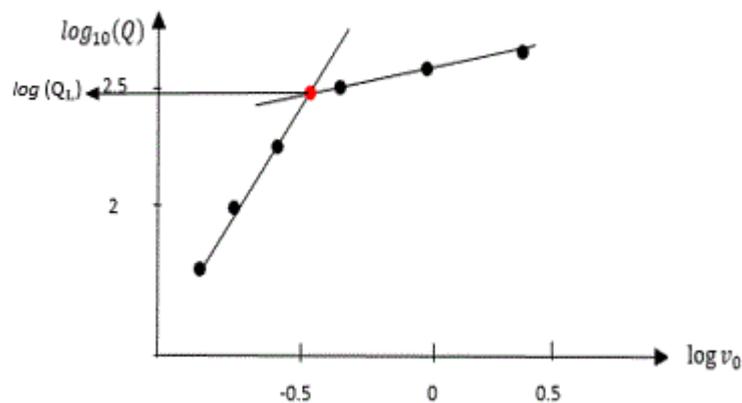


Figure 1.11 : Interprétation selon le critère De Beer.

1.6.6. Critère de décourt (ou critère de la raideur sécante) :

Décourt (1999) a proposé un critère similaire à celui de Chin-Kondner et Hansen.

La méthode consiste à tracer la courbe $k_v=Q/v_0$, en fonction de Q , k_v est la raideur sécante du pieu (force/tassement), cette courbe présente une tendance linéaire dans sa dernière partie, La capacité portante est caractérisée comme étant le point d'intersection du prolongement de cette droite avec l'axe des charges (Figure 1.12).

La capacité portante est caractérisée comme étant le point d'intersection du prolongement de cette droite avec l'axe des charges. Selon ce critère, la capacité portante est atteinte lorsque le tassement v_0 du pieu est infini, et donc la raideur $k_v= Q/v_0$ tend vers zéro.

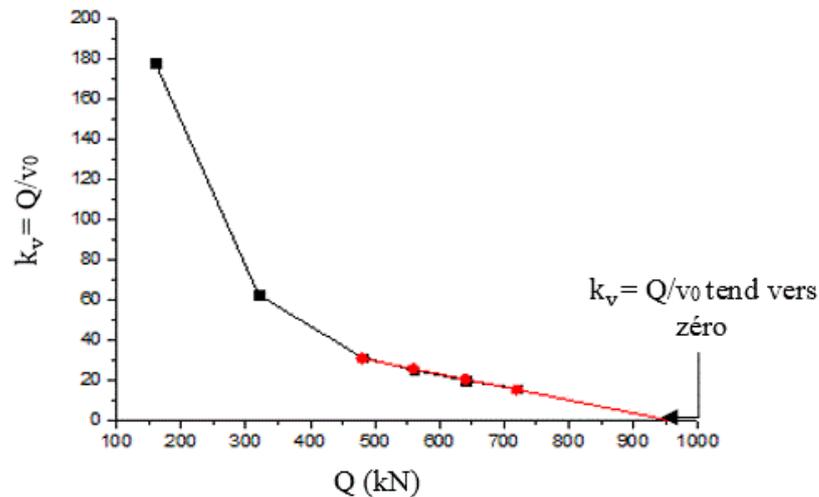


Figure 1.12 : Interprétation selon le critère de Décourt (1999).

1.6.7. Critère de FDOT (1994) :

Ce critère a été mis au point par l'organisme FDOT (Florida Dept of Transportation), La charge verticale limite correspond conventionnellement à un tassement au déplacement élastique du pieu ΔL , auquel on ajoute un facteur égal au diamètre du pieu divisé par 30.

Le déplacement élastique du pieu ΔL est donné par la formule suivante :

$$\Delta L = \frac{Q \cdot D}{S \cdot E_p} \quad (1.3)$$

Avec

Q : La charge appliquée.

D : Longueur de pieu.

S : Section de pieu.

E_p : Le module de Young de pieu (estimé à environ 32000 MPa).

Ce critère est applicable pour le pieu tel que le diamètre supérieur à 0.6m. Si ce dernier inférieur à 0.6 m, la capacité portante correspond à :

$$\Delta l + 4mm + B/12 \text{ (Avec le diamètre B en mm).}$$

Il suffit de tracer la courbe de chargement-tassement et la droite de déplacement élastique.

$$Q = \frac{E_p \cdot S}{D} \cdot \Delta L = \alpha \cdot \Delta L \quad \text{Où} \quad \alpha = \frac{E_p \cdot S}{D}$$

Cette dernière est translatée de $B/30$. La capacité portante est définie comme étant le point d'intersection de la droite translatée avec la courbe de chargement-tassement (voir figure 1.13).

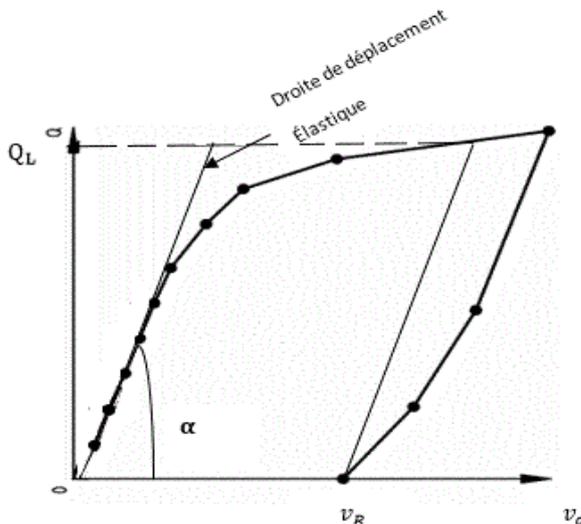


Figure 1.13 : Interprétation selon le critère FDOT.

1.6.8. Critère de Fuller et Hoy (1950) :

Fuller & Hoy (1970) a défini la charge ultime comme étant le point où la droite de pente (7KN/mm) est tangente à la courbe charge-déplacement (figure 1.14). L'inconvénient avec cette méthode, c'est qu'elle pénalise les pieux longs car le déplacement élastique dans ce dernier est plus important que celui des pieux court, d'où la pente de (7 KN/mm) est atteinte pour des charges plus faible dans le cas d'un pieu long que pour un pieu court (Fellenius, 1990).

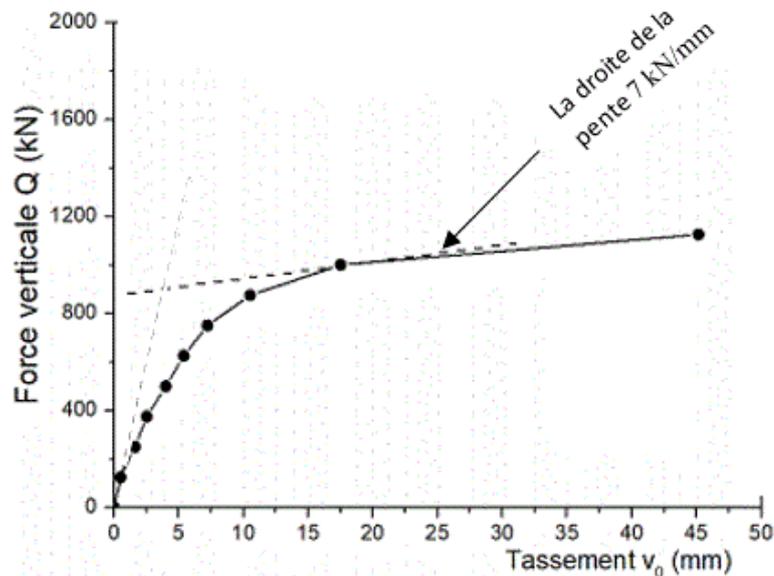


Figure 1.14 : Interprétation selon le critère de Fuller et Hoy (1950).

1.6.9. Critère de Hansen 1963 (ou critère de 80%) :

Hansen a défini la capacité portante de pieu comme étant une charge qui donne 4 fois le tassement. Le tassement de la tête de pieu, obtenu pour de 80 % de cette charge [23]. Ce critère de 80 % peut être estimé directement à partir de la courbe de chargement-tassement ou à partir de la procédure suivante (voir la figure 1.15) :

- Tracer la courbe $V_0^{1/2}/Q$ en fonction de V_0 , où V_0 est le tassement mesuré en tête de pieu et Q est la charge appliquée.
- Ajuster l'allure linéaire par une droite $a+bV_0$ selon la méthode des moindres carrés.

La capacité portante de pieu est donnée par la formule suivante :

$$QL = \frac{0.5}{(a \cdot b)^{0.5}} \tag{1.4}$$

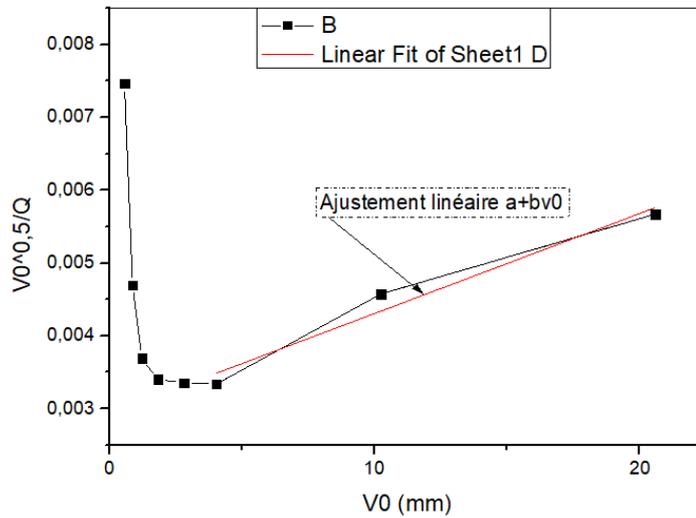


Figure 1.15 : Interprétation selon le critère de Hansen (1963).

1.6.10. Critère parabole rectangle (PARECT) :

1.6.10.1. Étude de la fonction parabole-rectangle :

On cherche une fonction $y = f(x)$ vérifier les conditions aux limites suivantes :

- a) $y_1 = f(x_1)$
- b) $dy / dx (x=0) = a$
- c) $dy / dx (x > x_1) = 0$ (où : $y = y_1$ pour $x = x_1$)
- d) $d^2y / dx^2 < 0 \longrightarrow 0 \leq x \leq x_1$
(Courbe dirigé vers le bas)
- e) $y(0) = 0$

On propose une fonction polynôme N=2

$$y = a' + b'x + c'x^2 = f(x)$$

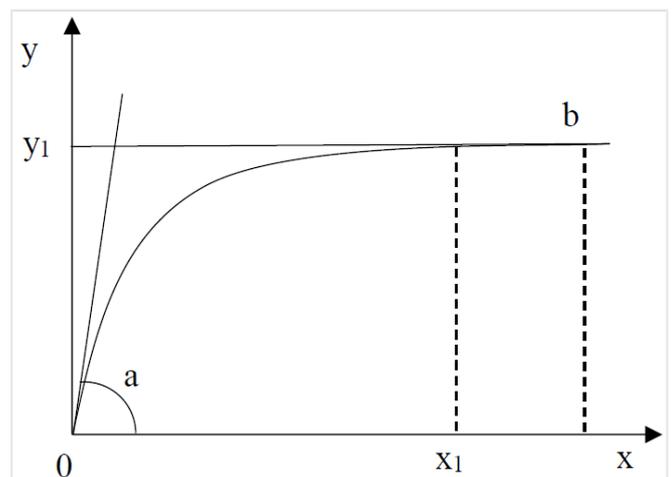


Figure 1.16 : Courbe de la fonction

polynôme.

$$e) y(0) = 0 \Rightarrow a' = 0$$

$$b) dy/dx = b' + 2c'x; dy/dx = a = b'$$

$$c) dy/dx = 0 \Rightarrow b' + 2c'x_1 = 0 \Rightarrow c' = -b'/2x_1 = -a/2x_1$$

$$d) d^2y/dx^2 = 2c' < 0 \text{ car } c' < 0$$

$$a) y_1 = f(x_1) = ax_1 + (-a/2x_1 x_1^2) = ax_1 - ax_1/2 = ax_1/2 = y_1 \Rightarrow x_1 = 2y_1/a$$

On écrit la fonction f(x) :

$$Y = f(x) = ax - (ax^2/2x_1) = ax(1 - x/2x_1) \quad (1.5)$$

D'après l'expression (3.1) on obtient :

$$Y = 2y_1 (x/x_1) (1 - 1/2 (x/x_1)) \quad (1.6)$$

$$\text{Avec : } x_1 = 2y_1/a \quad (1.7)$$

Pour imposer que la fonction soit impaire, il suffit de l'écrire :

$$Y = 2y_1 (x/x_1) (1 - 1/2 |x|/x_1) \quad (1.8)$$

L'avantage d'une telle formule est qu'elle permet d'atteindre l'asymptote horizontale (résistance, capacité portante, frottement latérale limite, résistance en pointe, résistance latérale du sol...etc.), pour un déplacement x_1 fini (contrairement à la fonction hyperbolique ou $x_1 \rightarrow \infty$), ce qui est plus réaliste et est conforme aux observations expérimentales.

1.6.10.2. Propriétés de la fonction parabole-rectangle :

1. Charge critique :

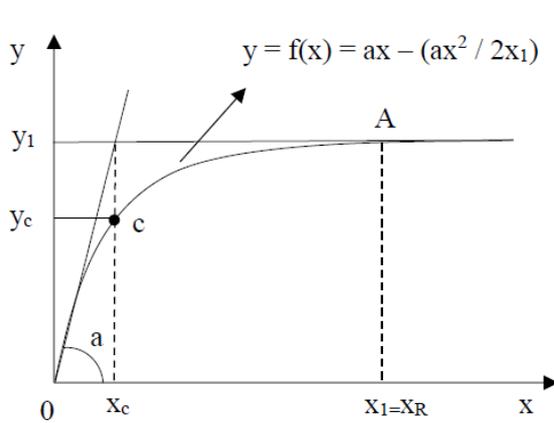


Figure 1.17 : Représentation des Comportement.

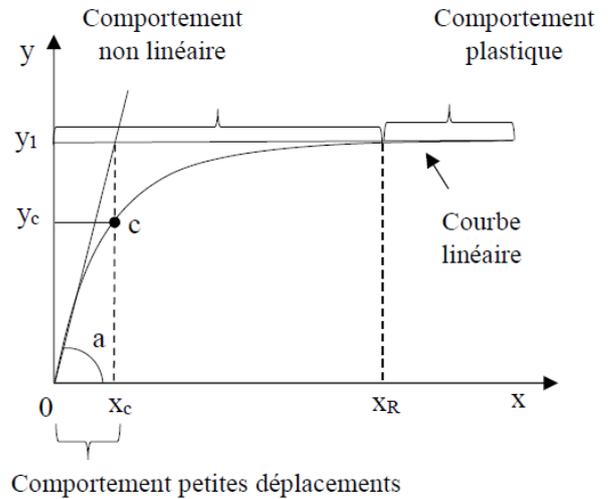


Figure 1.18 : Courbe de la fonction Parabole-rectangle.

On voit que :

$$\boxed{x_c = y_1 / a} : \text{déplacement critique (seuil du comportement non linéaire)}$$

Calculons la charge critique :

$$y_c = 2y_1 (x_c / x_1) (1 - 1/2 (x_c / x_1)) \tag{1.9}$$

On remplace xc par sa formule est en obtient :

$$\boxed{y_c = 3y_1 / 4} \tag{1.10}$$

yc est la charge critique, elle correspond au déplacement critique xc.

Le seuil du comportement plastique ($x \geq x_1$) est appelé « déplacement de référence » où « déplacement ultime ». Sa formule :

$$X_R = 2y_1 / a = x_1$$

On voit que $\boxed{X_R = 2x_c}$.

2. Rigidité sécante et tangente :

- La rigidité tangente : $K_t = dy / dx = a - ax / x_1 = a (1 - x/x_1)$ (1.11)

- La rigidité sécante : $K_s = y / x = a - 1/2 a (x/x_1)$ (1.12)

On voit que lorsqu'on atteint le comportement plastique la rigidité diminue de la moitié

$$x = X_R \Rightarrow K_s = a - (ax_1 / 2x_1) = a/2$$

3. Fonction impaire :

On écrit dans ce cas :

$$y = 2y_1 (x / x_1) (1 - 1/2 |x| / x_1)$$

On a bien $\forall x : y(-x) = -y(x)$

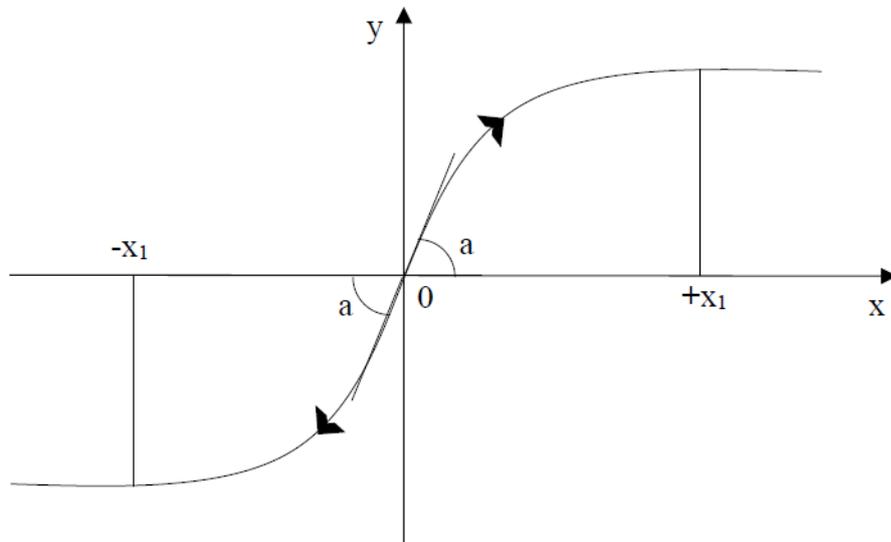


Figure 1.19 : La fonction impaire de PARECT.

4. Nombre de points expérimentaux N :

Pour que l'ajustement par une parabole soit possible il faut que $N_1 \geq 3$, et pour ajuster les derniers points (N_{1+1}, N) par une droite horizontale il faut que $N - N_1 \geq 3$:

$$N - N_1 \geq 3 \quad \Rightarrow \quad N \geq N_1 + 3 \geq 6.$$

Le nombre minimum de points expérimentaux est donc 6.

1.6.10.3. Programme Parect (parabole-rectangle) :a. Ajustement linéaire par moindres carrés avec b imposé :

Soit $y = a + bx$.

$$\text{On doit avoir } \sum_{i=1}^N (y_i - (a + b x_i))^2 \longrightarrow \frac{\partial}{\partial a} \sum (y_i - (a + b x_i))^2 = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial a} \sum (y_i)^2 + \sum (a + bx_i)^2 - 2 \sum (a + bx_i)y_i = 0$$

$$\Rightarrow 2 \sum (a + bx_i) y_i - 2 \sum y_i = 0 \quad (a + bx_i) = \sum y_i$$

$$\Rightarrow Na + b \sum x_i = \sum y_i \quad \Rightarrow \quad b = \frac{\sum y_i - Na}{\sum x_i}$$

Or on a : $y = ax - ax^2 / 2x_1$; avec $x_1 = 2y_1 / a$

$$\Rightarrow \frac{y}{x} = a - \frac{ax}{ax_1} = a - \frac{axa}{2(2y_1)} = a - \frac{a^2x}{4y_1} \rightarrow b = \frac{-a^2}{4y_1}$$

$$\Rightarrow b = \frac{\sum y_i - Na}{\sum x_i} = \frac{-a^2}{4y_1} \longrightarrow \frac{4y_1}{\sum x_i} - \frac{4y_1 Na}{\sum x_i} + a^2 = 0$$

On a donc l'équation quadratique en a :

$$\frac{1}{4y_1} - \frac{N}{\sum x_i} a + \frac{\sum y_i}{\sum x_i} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{4y_1} a^2 - \frac{a}{\bar{x}} + \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = 0$$

$$\Delta = \left(\frac{1}{\bar{x}}\right)^2 - \frac{4}{4y_1} \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \left(\frac{1}{\bar{x}}\right)^2 - \frac{\bar{y}}{y_1 \bar{x}}$$

$$a_{1,2} = \frac{\frac{1}{\bar{x}} \pm \sqrt{\Delta}}{\frac{2}{4y_1}} = \frac{\frac{1}{\bar{x}} \pm \sqrt{\Delta}}{\frac{1}{2y_1}} \quad \Rightarrow \quad a_{1,2} = \left(\frac{1}{\bar{x}} \pm \sqrt{\Delta}\right) 2y_1$$

b. Principe de programme :

En utilisant un programme adopté PARECT qui se base sur la linéarisation de la fonction

$y = f(x) = ax - (ax^2 / 2x_1)$ et on ajuste les points expérimentaux par la droite

$y = a + bx$ avec $b = -a^2 / 4y_1$.

$y_1 = y_u$ est obtenu par l'ajustement des derniers points ($N_1 + 1 \Rightarrow N$), comme suit :

$y = f(x) = a'$

$$\frac{\partial \sum (y_i - a')^2}{\partial a'} = 0 \rightarrow \frac{\partial}{\partial a'} (y_i^2 - 2y_i a' + a'^2) = 0 \rightarrow$$

$$\frac{\partial}{\partial a'} (\sum y_i^2 - 2a' \sum y_i + (N - N1)a'^2) = 0 \rightarrow -2 \sum y_i + 2(N - N1)a' = 0$$

$$\Rightarrow a' = \frac{\sum y_i}{(N - N1)} = \bar{y}$$

Ainsi, la meilleure droite horizontale est celle correspondant à la valeur moyenne de y dans l'intervalle (N1+1 ; N) :

$$y = f(x) = \bar{y} = \frac{\sum y_i}{x} = y_u$$

La qualité de l'ajustement de l'ensemble des points expérimentaux (xi, yi) par la fonction parabole rectangle est mesurée par le coefficient de régression globale :

$$R^2 = \frac{\text{ecart expliqué}}{\text{ecart totale}} = \frac{\sum [f(x_i) - \bar{y}]^2}{\sum_i [(y_i - f(x_i))^2 + \sum_i [f(x_i) - \bar{y}]^2}$$

1.6.11. Critère de van der veen 1956 (ou critère exponentiel) :

Van der Veen a proposé d'assimiler la courbe de chargement-déplacement à une fonction exponentielle telle que :

$$Q = Ql (1 - \exp(-\frac{kv_0}{Ql} v_0)), \text{ Soit de la forme :} \quad (1.13)$$

$$y = a (1 - \exp(-b \cdot x)), \text{ avec : } y = Q \text{ et } x = v_0$$

La courbe de chargement, comme le schématise la figure 1.20, est caractérisée souvent par une portion linéaire pour les faibles charges : $Q = kv_0 \cdot v_0$

Et une asymptote pour les grands dépèchements du pieu :

$$\text{Lim } Qv_0 \rightarrow \infty = Ql$$

La fonction hyperbolique regroupe les deux propriétés ci-dessous selon la formule suivante :

$$Q = \frac{v_0}{\frac{1}{kv_0} + \frac{v_0}{Ql}} \quad (1.14)$$

Donc $\frac{v_0}{Q} = \frac{1}{kv_0} + \frac{v_0}{Ql}$ est une droite.

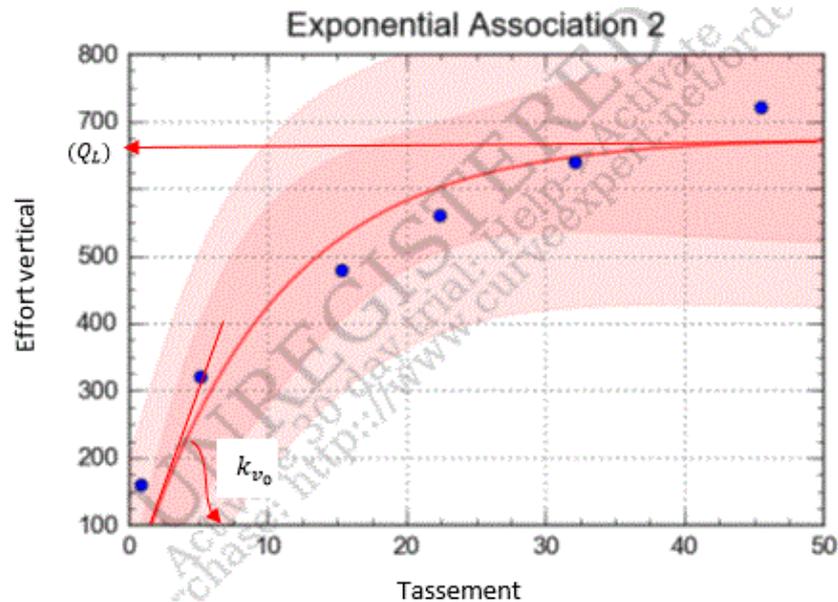


Figure 1.20 : Interprétation selon le critère de Van der Veen.

k_{v_0} : Raideur verticale initiale du pieu.

Q_L : Capacité portante du pieu.

La valeur de charge verticale limite est déduite par ajustement de la courbe de chargement expérimentale par cette fonction exponentielle.

1.7. Conclusion :

Ce chapitre explique également le comportement de pieux à l'aide des essais de chargement axial, ensuite nous avons présenté les différents critères d'estimation de la capacité portante verticale, et nous avons terminé par un exemple d'application de tous les critères.

Pratiquement, les essais de chargement en vraie grandeur sont le meilleur outil pour l'analyse in-situ de la capacité portante et du tassement d'un pieu isolé.

Finalement le but de ces essais a déterminé directement la courbe charge-tassement du pieu et déduire après la charge limite Q_L , la charge critique Q_c , et la charge admissible sur le pieu.

Chapitre

02

*Étude bibliographique des
critères de résistance latérale
des pieux*

2.1. Introduction :

Après avoir présenté dans le premier chapitre tout ce qui touche aux réalisations d'essais de chargement vertical et présentation d'application des critères, maintenant ce chapitre présente une synthèse bibliographique du comportement latéral des pieux isolés sous un chargement horizontal. Ensuite nous avons présenté les différents critères d'estimation de la résistance latérale, et nous avons terminé par un exemple d'application de tous les critères.

2.2. L'essai de chargement latéral :

2.2.1. Principe des essais :

L'essai consiste :

- À appliquer sur un pieu fiché dans le sol un effort statique transversal H passant par l'axe du pieu (voir figure 2.1) selon un programme de chargement et déchargement imposé (voir figure 2.2). [24]
- à mesurer le déplacement transversal y (voir figure 2.3) et la rotation y' correspondant en tête et éventuellement les rotations et les moments de flexion M induits dans le fût du pieu (voir figure 2.4). [24]

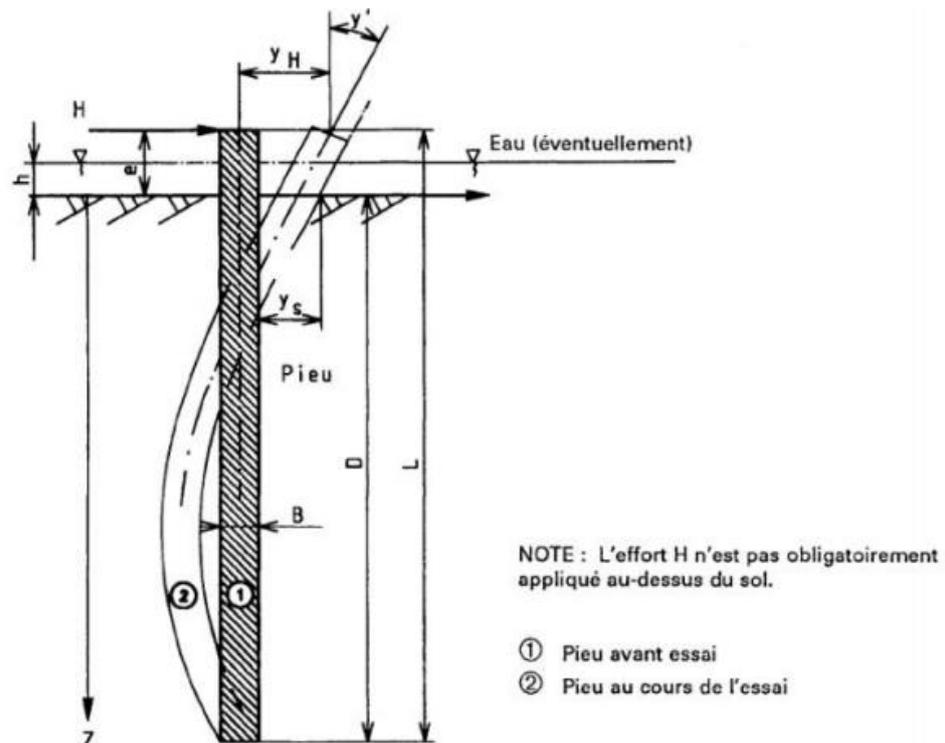


Figure 2.1 : Principe de l'essai statique de pieu isolé sous effort transversal. [12]

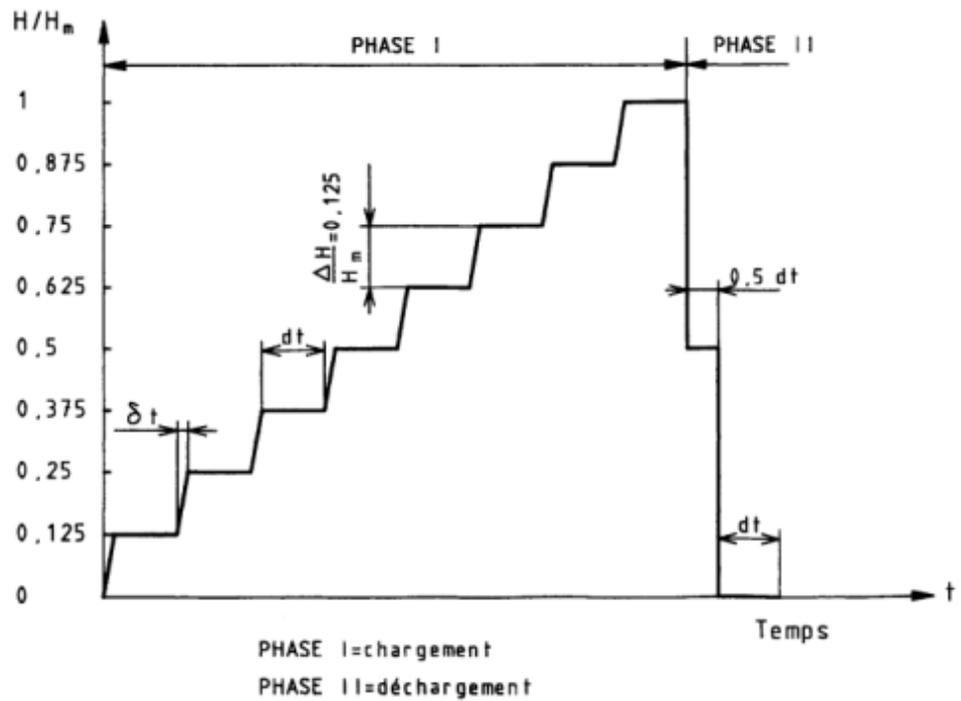


Figure 2.2 : Programme de chargement-déchargement par palier. [12]

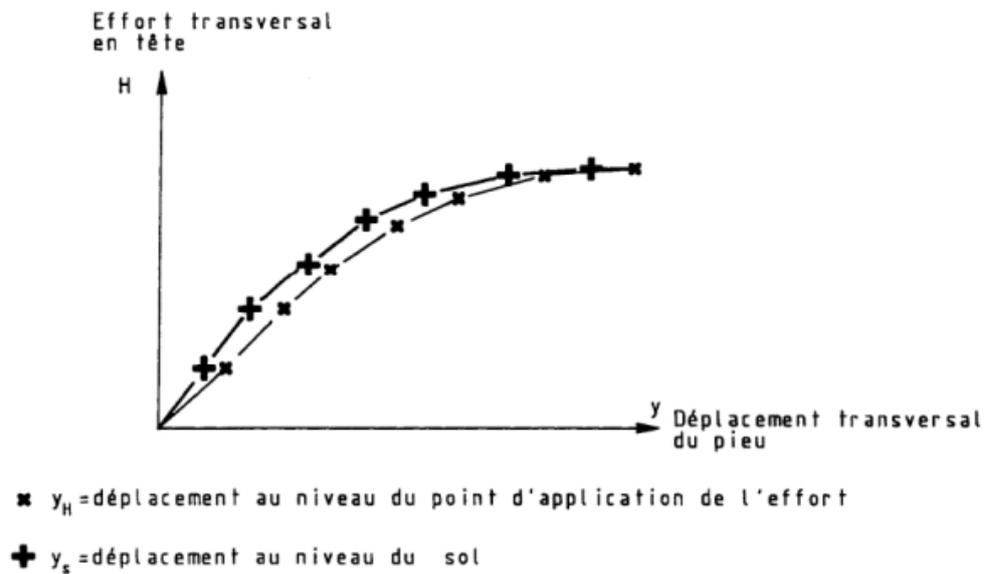


Figure 2.3 : Courbe effort-déplacement transversal du pieu en tête. [12]

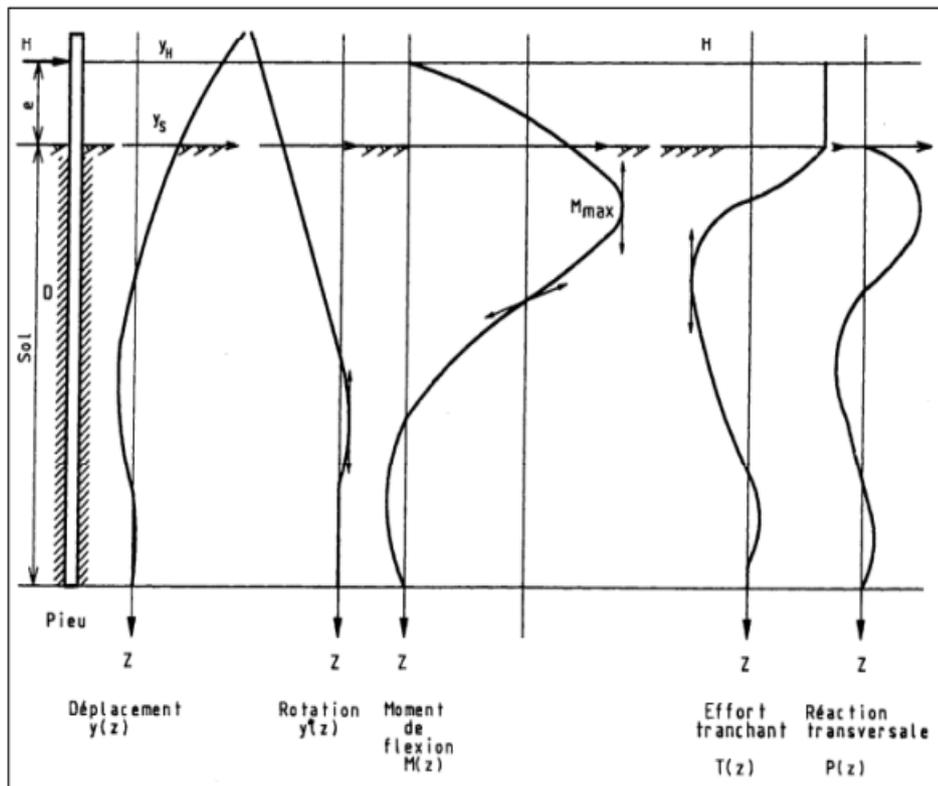


Figure 2.4 : Pieu soumis à un effort transversal — Courbes types. [12]

- L'effort transversal est appliqué en tête du pieu par incréments DH (voir figure 2.4). Chaque charge est maintenue constante pendant une durée dt . La durée dt du passage d'un palier au suivant est inférieure à une valeur fixée. [12]

Le déchargement se fait avec un seul palier maintenu pendant une durée $0,5 dt$.

2.2.2. Appareillage :

La réalisation d'un essai nécessite l'ensemble du matériel suivant :

- Un système de réaction.
- Un dispositif d'application de l'effort transversal sur le pieu.
- Un dispositif de mesurage et de repérage.

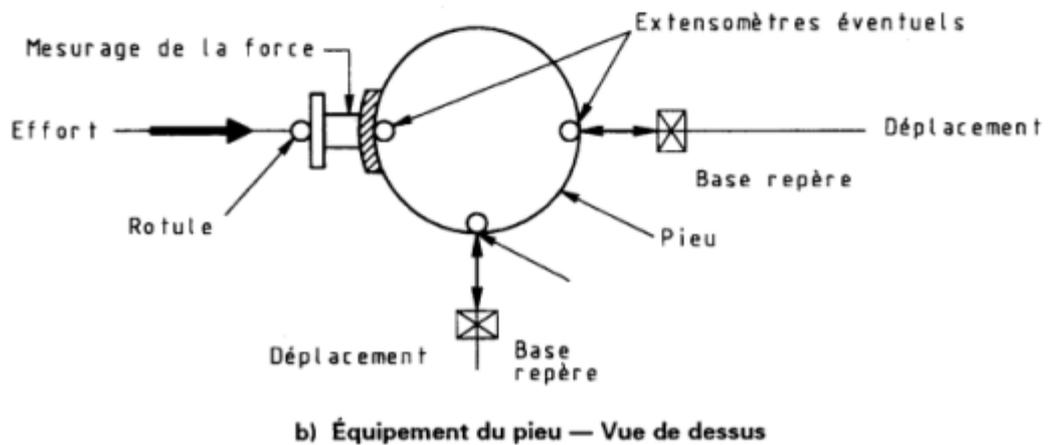
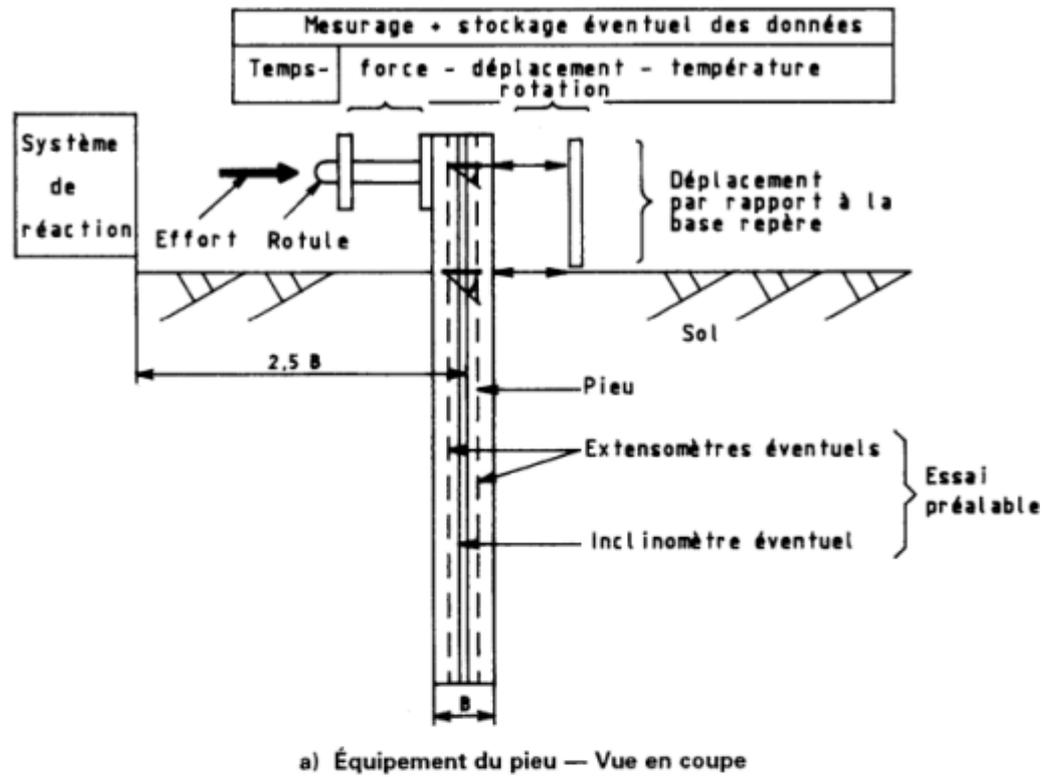


Figure 2.5 : Appareillage de l'essai statique sous effort transversal — Principe.

[12]

2.2.3. Le système de réaction :

L'effort en tête est appliqué indifféremment en exerçant une force de poussée ou de traction mais en tenant compte de l'environnement, du site et de l'amplitude des forces. Le dispositif de réaction doit être stable sous l'effort maximal et sans incidence sur l'essai. Si une force de poussée est exercée sur le pieu d'essai en s'appuyant sur un pieu voisin, celui-ci doit être placé à au moins 2,5 fois la largeur frontale B du pieu d'essai. [12]

2.3. Le système d'application de l'effort sur le pieu :

Le matériel, équipé d'un dispositif de sécurité afin d'éviter tout chargement ou déchargement accidentel, permet : [12]

- D'appliquer, dans un plan vertical contenant l'axe du pieu, un effort transversal au moins égal à la charge maximale prévue H avec une course suffisante pour absorber les déplacements du pieu et du système de réaction,
- De maintenir constant l'effort transversal pendant toute la durée des paliers,
- D'atteindre un palier de chargement en une durée dt inférieure à 1 min,
- De connaître l'inclinaison de la direction de l'effort par rapport à l'horizontale.

2.3.1. Dispositif de mesurage :

a. Temps :

Le moyen de mesure doit permettre d'apprécier la seconde. [12]

b. Déplacement de la tête du pieu.

Les déplacements sont mesurés par rapport à des repères éloignés d'au moins 2,5 m du bord du pieu Perpendiculairement à l'axe de l'effort) et du système de réaction. La plage de mesure du déplacement dans la direction de l'effort appliqué doit être au moins 1,5 fois le déplacement maximal estimé H , au niveau du point d'application de l'effort. Le déplacement dans le plan orthogonal à l'axe du pieu est mesuré selon la direction de l'effort et selon une direction perpendiculaire. Les déplacements horizontaux du pieu sont également contrôlés au moyen d'un matériel topographique ou de tout autre dispositif. [12]

c. Rotation du pieu :

- Sur la partie hors sol La rotation est mesurée au moyen de clinomètres fixés sur le pieu ou incorporés au pieu dans le cas de pieu en béton), de capteurs de déplacement d'espacement connu entre eux ou d'un ensemble du type niveau mire/miroir.
- Le long du fût La mesure est faite au moyen d'une sonde Inclinométrie mobile par auscultation d'un tube solidaire du pieu, ou au moyen de clinomètres fixes ou incorporés au pieu.
- Effort horizontal L'effort est mesuré au moyen d'un dispositif situé dans le plan contenant la direction de l'effort et l'axe du pieu. L'inclinaison de l'axe de l'effort est déterminée par rapport à un plan horizontal.

d. Déformations longitudinales du pieu :

Lorsque de telles mesures ont lieu, les déformations sont déterminées, dans le plan axial du pieu contenant la direction de l'effort, au moyen de couples d'extensomètres ayant une distance d'entraxe connue, disposés symétriquement, par rapport au centre du pieu, et situés dans le même plan transversal. [12]

e. Température :

La température extérieure est mesurée, sur le site et sous abri. [12]

f. Visualisation des grandeurs mesurées :

Quel que soit le moyen de mémorisation des données, l'opérateur doit disposer d'une visualisation simultanée des grandeurs mesurées : temps, force, déplacement, température. [12]

g. Matérialisation d'un périmètre de sécurité :

Un périmètre de sécurité est délimité avec interdiction d'accès sauf au personnel effectuant les mesures. [12]

h. Base de repérage :

Des relevés topographiques sont effectués afin de contrôler les mouvements accidentels. La base de repérage est rattachée à une base topographique de référence qui permet de connaître à chaque palier de chargement la position de la tête du pieu avec une incertitude inférieure ou égale à 1 mm [12].

2.3.2. Incertitudes de mesurage :

a. Déplacement mesuré au niveau du soi en site terrestre [12]

Incertitude inférieure ou égale à la plus grande des deux valeurs suivantes :

- 0,1 mm,
- 2/1 000 de la valeur lue.

b. Temps Incertitude inférieure ou égale à 0,1 s. [12]

c. Inclinaison de la direction de l'effort par rapport à l'horizontale Incertitude inférieure ou égale à $5 \cdot 10^{-2}$ Radian. [12] d. Inclinaison de la sonde In clinométrie par rapport à la verticale Incertitude inférieure ou égale à $5 \cdot 10^{-2}$ radian. [12] e. Effort transversal Incertitude inférieure ou égale à la plus petite des deux valeurs suivantes : [12]

- 5 % de la valeur mesurée,
- 1 % de l'effort maximal.

d. Déplacement contrôlé par un appareil topographique Incertitude inférieure ou égale à 1 mm [12].

e. Inclinaison des clinomètres par rapport à l'horizontale Incertitude inférieure ou égale à $5 \cdot 10^{-2}$ radian. [12]

f. Température

Incertitude inférieure ou égale à 1 °C. [12]

2.4. Mode opératoire :

2.4.1. Préparation de l'essai :

Avant de réaliser un essai, il faut rassembler les informations sur le site et sur l'ouvrage, connaître le but de l'essai ainsi que les caractéristiques du pieu, afin de

définir le système de réaction, le dispositif de chargement et de mesurage, le programme de chargement. [12]

a. Données à recueillir sur l'ouvrage et sur le site

- Plan masse.
- Rapport complexe des études de sol déjà réalisées avec toutes les annexes contenant le plan d'implantation des sondages, les résultats des sondages et des essais géotechniques.
- Hypothèses prises en compte pour dimensionner le pieu coupe géotechnique. Caractéristiques mécaniques du sol, régime hydraulique, efforts à reprendre.
- Position du repère topographique avec ses coordonnées. [12]

b. Données sur le pieu soumis à essai

- Date de mise en place.
- Géométrie : longueur, aire de la section droite du pieu, aire de la section droite des armatures.
- Implantation, inclinaison par rapport à la verticale dans deux directions perpendiculaires, sens d'application de l'effort en tête.
- Nature :
- Métal (module d'élasticité, section d'acier, type de profilé).
- Béton composition, date du bétonnage, résistance à l'écrasement des éprouvettes dont la date, la position, le mode de prélèvement doivent être précisés, nature des aciers, plan de ferrailage).
- Type de pieu et mode de mise en œuvre.
- Emplacement et caractéristiques (géométrie, module d'élasticité des tubes nécessaires au passage de la sonde Inclinométrie mobile et/ou pour l'utilisation éventuelle d'extensomètres, éventuellement).
- Estimation du comportement du pieu sous l'effet d'un effort transversal appliqué en tête à partir d'une méthode de calcul utilisant le module de réaction : courbe effort déplacement en tête ; courbe déplacement en tête - moment maximal dans le pieu.
- Moment maximal MG compatible avec un comportement élastique des matériaux constitutifs du pieu. [12]

c. Détermination de l'effort maximal transversal H_u

❖ Essai préalable

- L'effort H auquel il est prévu de soumettre le pieu d'essai est soit imposé contractuellement, soit déterminé de telle sorte qu'à la fois. [12]
- Le moment maximal dans le pieu reste inférieur ou égal à 0,8 MG
- Le déplacement au niveau du sol soit inférieur ou égal à 0,1B.

❖ Essai de control

L'effort H_u est déterminé sans dépasser l'une des deux limites suivantes : [12]

- Le déplacement maximal y égal à la valeur fixée, contractuellement : $y_s = 1,5 y_a$
- Le moment maximal induit dans le pieu égal à 0,8 Mg.

2.4.2. Préparation du pieu :

a. Instrumentation

❖ Pour un essai d'e contrôle

- Seule la partie hors sol est instrumentée.
- Mettre en place les appareils destinés à la mesure du déplacement et de la rotation au niveau du point d'application de l'effort et au niveau du sol. [12]

Dans le cas d'un pieu en béton, les clinomètres sont soit noyés dans le béton, soit scellés au niveau du point d'application de l'effort et au niveau du sol. [12]

❖ Pour un essai préalable

Mettre en place :

- Les appareils destinés à la mesure du déplacement et de la rotation au niveau du point d'application de l'effort et au niveau du sol. La partie du pieu hors du sol doit être de hauteur aussi limitée que possible.
- Les appareils destinés à la mesure de la rotation du fût :
- Dans le cas d'un pieu en béton, le tube Inclinométrie est solidarisé, avant le bétonnage, avec la cage d'armatures.
- Dans le cas d'un pieu en métal, le tube Inclinométrie est solidarisé au pieu avec un espacement des points de fixation inférieur ou égal à 0,5 m.

- Les extensomètres éventuels. Un schéma d'instrumentation d'un pieu est donné en figure 2.5 [12]
- b. Renforcement de la section transversale du pieu au niveau du point d'application de l'effort À effectuer, si nécessaire, afin de limiter la déformation transversale du pieu. [12]

2.4.3. Processus de déroulement de l'essai :

Le délai entre l'exécution du pieu et l'essai de chargement, doit permettre d'obtenir une résistance suffisante des matériaux constitutifs du pieu et la dissipation des phénomènes transitoires affectant le sol encaissant pendant la phase de mise en place du pieu.

Ce délai peut varier de quelques jours à 4 semaines. [12]

- a. Vérifications et mesures initiales Vérifier le bon fonctionnement du matériel et effectuer la lecture « zéro » des appareils de mesure effort-déplacement-rotation avant le démarrage de l'essai. [12]
- b. Programme de chargement-déchargement.

❖ Essai préalable :

Le chargement du pieu d'essai s'effectue par paliers d'incrémentes égaux à $0,125 H_u$ maintenus 30 min jusqu'à atteindre l'effort maximal H_m . Le déchargement comporte 1 seul palier à $0,5 H_m$ maintenu 15 min. L'essai est arrêté dès que l'une des limites est atteinte : le déplacement au niveau du sol est de $0,1 B$ ou le moment maximal est de $0,8 MG$.

❖ Essai de contrôle :

L'effort transversal maximal H_u ayant été fixé contractuellement, le chargement se fait par paliers égaux à $0,125 H_u$ et maintenus constants pendant 30 min. Comme cet essai s'effectue sur un pieu de l'ouvrage, l'effort appliqué ne doit produire ni un moment supérieur à $0,8 MG$ ni un déplacement y supérieur à 1,5 fois le déplacement admissible (fixé contractuellement) pour l'ouvrage. L'essai est arrêté lorsqu'une des deux conditions n'est plus vérifiée. Le déchargement ne comporte qu'un seul palier à $0,5H$ maintenu pendant 15 min. [12]

c. Mesures :

Le début d'un palier correspond au moment où l'effort prévu est atteint. À chaque palier, les mesures de force, de déplacement et de rotation de la partie hors sol du pieu sont notées au moins aux temps $t = 5, 10$ et 30 min.

Les mesures à l'aide de la sonde Inclinométrie mobile sont effectuées sur toute la longueur du tube d'auscultation au moins au temps $t = 30$ min. L'espacement des niveaux de mesure de la rotation du pieu par rapport à la verticale doit être inférieur ou égal à $0,5$ m pour la partie du pieu située dans le sol et inférieur à 1 m pour la partie du pieu hors sol.

Les mesures des extensomètres éventuels sont faites au moins au temps $t = 30$ min.

La durée de lecture de l'inclinomètre et/ou des extensomètres ne doit pas excéder 5 min et chaque mesure doit être terminée au temps $t = 30$ min.

Lors du déchargement les mesures sont effectuées au bout de 15 min, elles sont renouvelées 30 min après le déchargement complet.

La température est notée au début de chaque palier. [12]

2.5. Expression des résultats :

Les mesures effectuées au cours de l'essai sont utilisées pour : [12]

- Connaître le déplacement du pieu y au niveau du sol.
- Déterminer la rotation du pieu en tête pour l'essai de contrôle et jusqu'à sa base pour l'essai préalable.
- Calculer le moment de flexion dans le pieu à partir d'une régression polynomiale ou toute méthode numérique adaptée utilisant les valeurs de rotation du pieu mesurées et les rigidités déduites des données.

Évaluer le moment maximal de flexion en fonction de l'effort transversal appliqué

2.6. Présentation des critères de la résistance latérale :

Dans le cas d'un pieu d'essai instrumenté seulement par des comparateurs pour la mesure du déplacement, et par un capteur de force, on obtient une seule courbe de chargement en fonction du déplacement global (en tête) du pieu, l'interprétation de cette courbe de chargement pour l'estimation globale de la résistance latérale limite des pieux se fait à l'aide des critères empiriques ou semi empiriques.

- Parmi les 11 critères qui ont déjà été présentés dans le chargement vertical, nous avons appliqué six critères qui permettent de déterminer la résistance latérale limite à partir de la courbe de charge-déplacement, et qui sont les suivantes :

- ⇒ 10 % de B

- ⇒ Hyperbolique

- ⇒ De Beer

- ⇒ Décourt

- ⇒ PARECT

- ⇒ Van der Veen

Les paramètres ressortant de l'interprétation des courbes de chargement pour les différents types de sols par le critère PARECT sont :

- La charge latérale ultime H_u , la raideur horizontale K_h .
- Concernant les autres critères, on a ressorti seulement la capacité portante limite H_u .

2.7. Conclusion :

Le comportement d'un pieu isolé sous chargement horizontal est très complexe et dépend principalement du comportement du sol entourant le pieu. Pour l'étude de ce comportement, la plupart des travaux de recherche tendent à mesurer le déplacement en tête de pieu et le moment fléchissant. Ces mesures permettent une analyse du comportement de la structure au sol du système en termes de charges horizontales appliquées.

Le comportement d'un seul pieu sous charge latérale peut être considéré comme un problème d'interaction sol-pieu. Ceci est généralement considéré comme une hypothèse de base pour résoudre de tels problèmes lorsque le pieu est installé dans une masse homogène infinie. Cependant, dès qu'un autre pieu est placé à proximité de la première position, on obtient un ensemble de pieux, et si le milieu n'est pas homogène, c'est-à-dire hétérogène : on a alors un problème de pieu-sol l'interaction du pieu est appelée effet de groupe.

Chapitre

03

*Description de la base de
données d'essais de
chargement vertical des
pieux*

3.1 Introduction :

Ce chapitre décrit des études descriptives des essais de chargement verticale statique des pieux isolés à divers endroits dans le monde en fonction de la nature de sol (sable, argile et multicouche). Dans le premier volet nous aborderons la description de l'essai de chargement du pieu, puis au deuxième volet nous présenterons une étude statistique des caractéristiques géométriques des pieux testés, les matériaux, et le mode d'installation du pieu.

3.2 Présentation de la base de données :

En général, la constitution de la base de données permet de connaître la géométrie et la mise en œuvre du pieu d'essai, ainsi une idée générale sur la coupe géotechnique des sites étudiés, ce qui nous permet de bien interpréter les données saisies et les utiliser pour un but de déterminer la capacité portante du pieu.

Dans notre projet, nous avons collecté des essais de chargement vertical de 50 pieux répartis dans 18 pays, (des pays asiatiques, européens, américains et un seul africain), Le plus grand pourcentage par rapport ces pays dans l'Amérique du nord (USA) de 22 %, et l'Europe (France) de 28 %, à partir de différentes bases de données comme le montrent la figure 3.1 et le tableau 3.1.

- Parmi ces essais, il y a 30 essais de chargement du pieu sont appliqués sur un sol multicouche, 12 essais appliqués sur un sol sableux et 8 essais de chargement du pieu sont appliqués sur un sol argileux.

Le tableau 3.2 montre que la longueur des pieux varie de 2.25 m à 80 m, et le diamètre varie de 0.1 m à 3 m.

- La figure 3.1 ci-dessous présente la répartition géographique des sites expérimentaux.

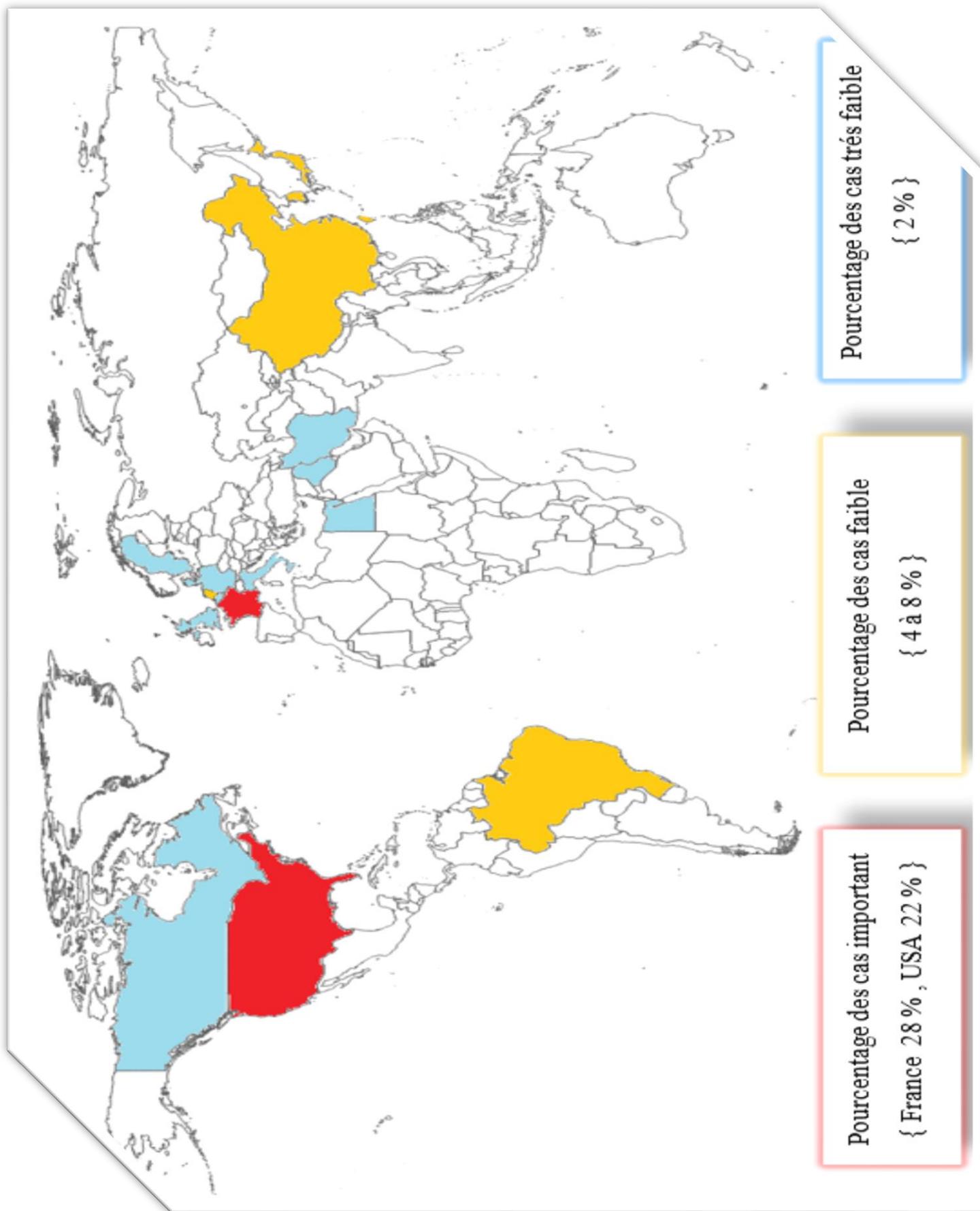


Figure 3.1 : Répartition géographique des sites expérimentaux.

Tableau 3.1 : Pays des essais de charge latéral sur pieux collectés.

Pays	Nombre des cas	Pourcentage des cas (%)
France	14	28
Chine	2	4
Pays-Bas	2	4
Irak	1	2
Italie	1	2
Usa	11	22
Royaume-Uni	1	2
Égypte	1	2
Danemark	1	2
Allemagne	1	2
Kuwait	1	2
Suède	1	2
Canada	1	2
Corée du Sud	2	4
Japan	4	8
Belgique	1	2
Taiwan	2	4
Brésil	3	6

Tableau 3.2 : Gamme de longueurs de cas et nombre de cas dans le sol multicouche

Sable et l'argile.

Catégories		Diamètre de pieu (m)
Gamme de longueur de pieux		2.25 - 80
Gamme de diamètre de pieux		0.1 - 3
Nombre de cas		50
Type de sol	Multicouche	30
	Sable	12
	Argile	08

3.2.1 Sites d'essais :

La base de données présente 50 cas d'essais de chargement sur 32 sites répartis dans le monde, avec 30 cas d'essais dans un sol multicouche, 12 sableux et 8 essais dans un sol argileux.

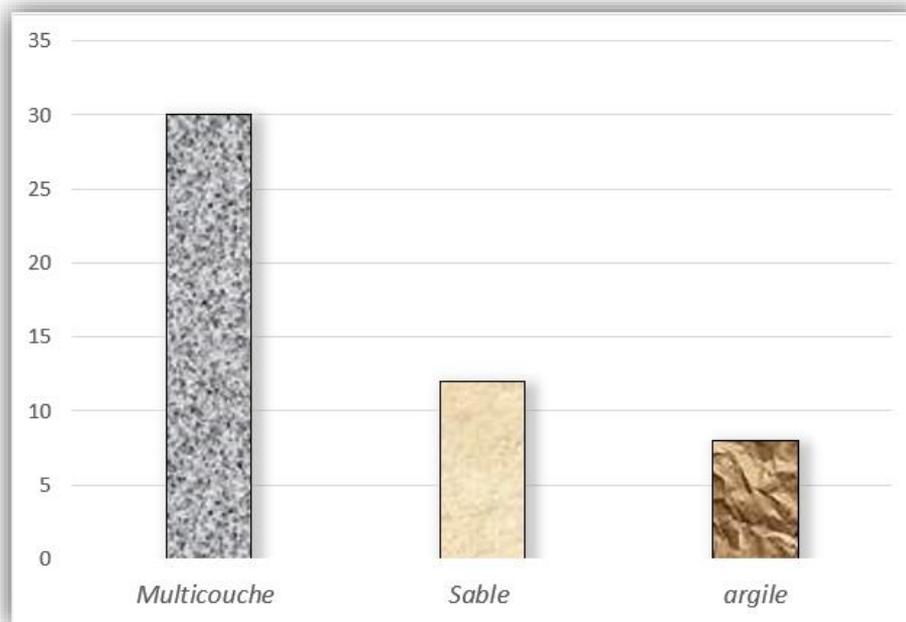


Figure 3.2 : Distribution en histogramme des essais de chargement selon la nature de sol.

3.3 Description d'un essai de chargement statique :

Les essais de chargement statique de pieux sont conçus pour évaluer la capacité portante des fondations profondes et leur tassement.

Le principe de l'essai consiste à appliquer une charge de traction ou de compression accrue sur un pieu réel et à observer le déplacement de la tête du pieu selon une procédure bien définie, qui équipé sur plusieurs heures.

Si le pieu est mesuré par des extensomètres (jauges de contrainte, extensomètres), la force peut être mesurée le long de l'axe pour déterminer les forces Q_s et Q_p , et donc la capacité portante.

La capacité portante globale est mesurée sur la base de l'interprétation de la courbe charge-déplacement lorsque les pieux d'essai sont mesurés pour le tassement par le comparateur.

La réalisation de cet essai à nécessité de l'appareillages suivant [23] :

- Un dispositif de réaction : massif-poids constitué de cuves remplies de gravillons ou poutres de réaction avec ancrages (pieux voisins pouvant être sollicités à l'arrachement ou tirants précontraints), figure 3.3.
- Un dispositif de chargement : vérin hydraulique transmettant l'effort au pieu par l'intermédiaire d'une rotule et d'une plaque de répartition comme schématisé la figure 3.4.
- Un dispositif de mesures :
 - Mesure des charges : manomètres branchés sur le circuit d'alimentation du vérin ou, ce qui est préférable, peson électrique intercalé entre le vérin et le pieu,
 - Mesure des déplacements en tête : niveau à lunette, comparateurs,
- On peut également mesurer les efforts à différents niveaux du fût : on instrumente alors le pieu d'extensomètres à différentes profondeurs (jauges collées, extensomètre amovible...etc.), figure 3.5.



Figure 3.3 : Massif de réaction [22].



Figure 3.4 : Vérin hydraulique [22].



Figure 3.5 : Jauge de mesure [22].

3.4 Description des essais de chargement dans le sol multicouche :

Les essais in-situ réalisés sur un sol multicouche sont comme suit :

Les figures ci-dessus montrent que 70 % des pieux d'essais sont en béton armé, et 30 % sont en acier, et pour le mode d'installation on a 43 % des pieux d'essais installés par forage, 33 % par vissage, 17 % fonçage et 7 % installés par vibro-fonçage comme montré dans la figure 3.6 et 3.7.

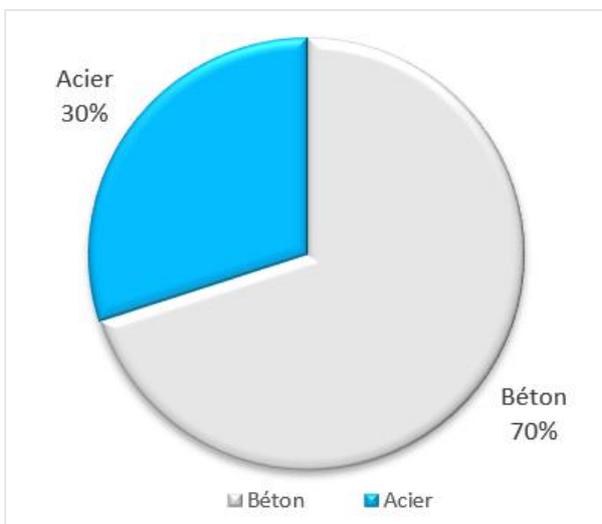


Figure 3.6 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol multicouche).

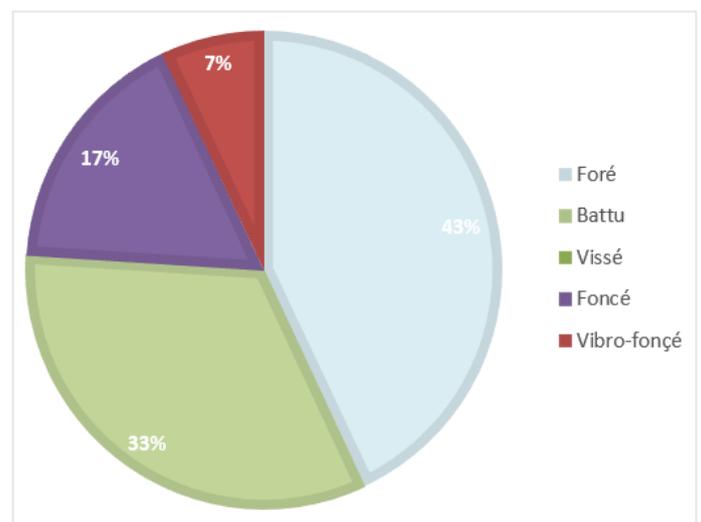


Figure 3.7 : Distribution en pourcentage Le mode de mise en place du pieu.

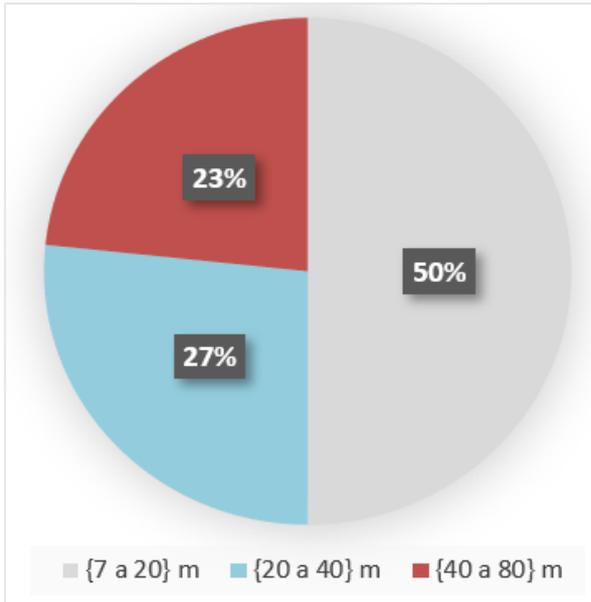


Figure 3.8 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol multicouche).

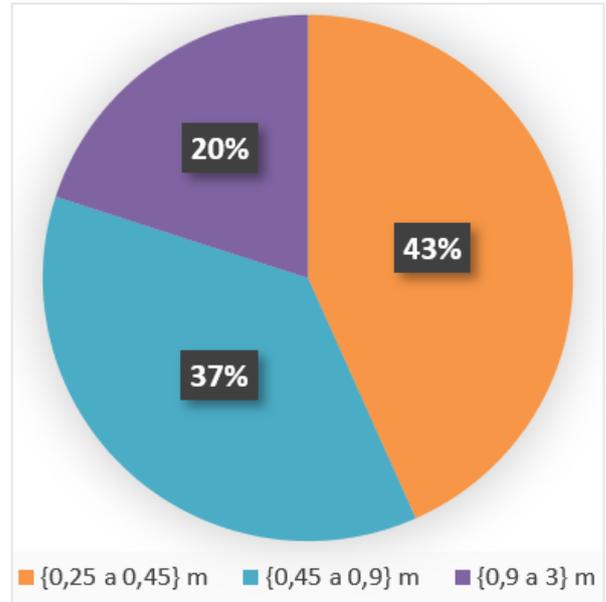


Figure 3.9 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol multicouche).

- La figure si dessus montrent qu'il y a 60 % sont à la base de l'essai CPT, 30 % sont à la base de l'essai CPT/PMT, et 10 % sont à la base de l'essai CPT/SPT.

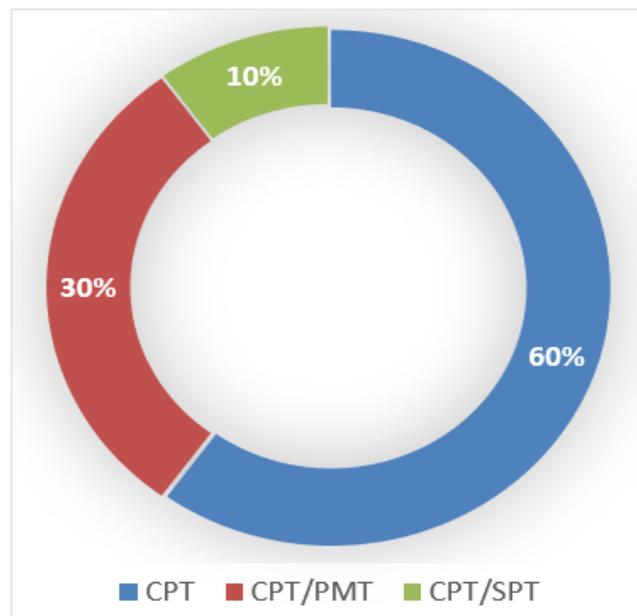


Figure 3.10 : Distribution en pourcentage selon le type de l'essai In-situ (sol multicouche).

3.5 Description des essais de chargement dans un sol sableux :

Les essais in-situ réalisés sur un sol sableux sont comme suit :

Les figures si dessus montre que 92 % des pieux d'essais sont en béton armé, et 8 % sont en acier, et pour le mode d'installation on a 50 % des pieux d'essais sont installé par forage, 42 % par battage, 8 % vissage et un pourcentage nul 0 % par fonçage et vibro-fonçage comme montre dans la figure 3.11 et 3.12.

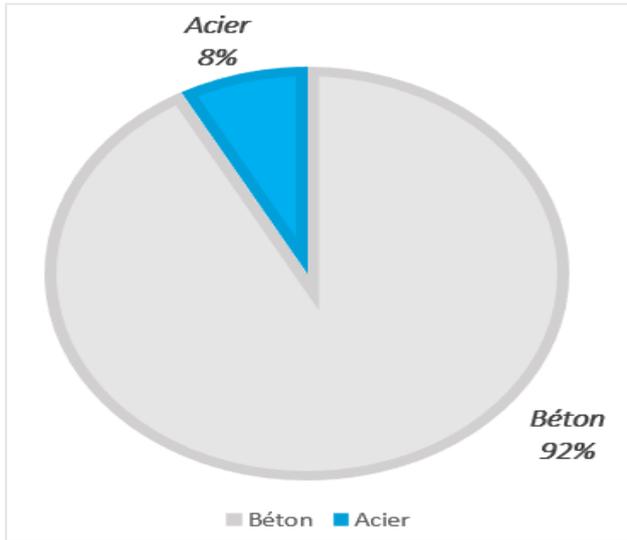


Figure 3.11 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol sableux).

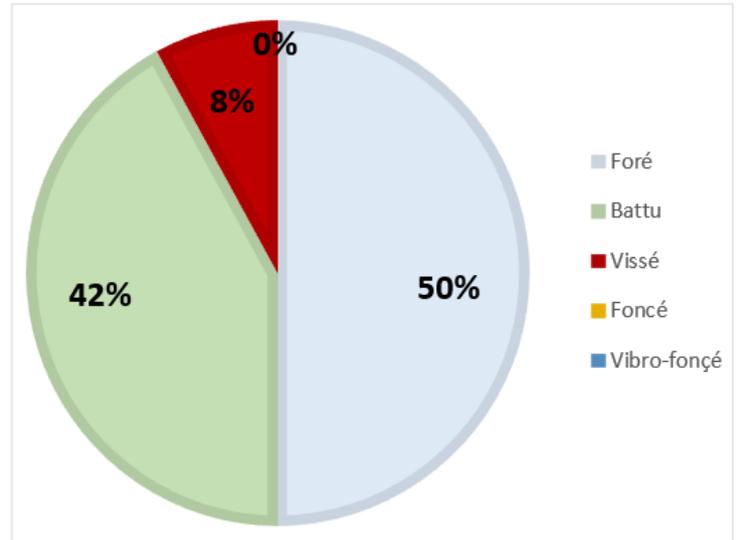


Figure 3.12 : Distribution en pourcentage Le mode de mise en place du pieu.

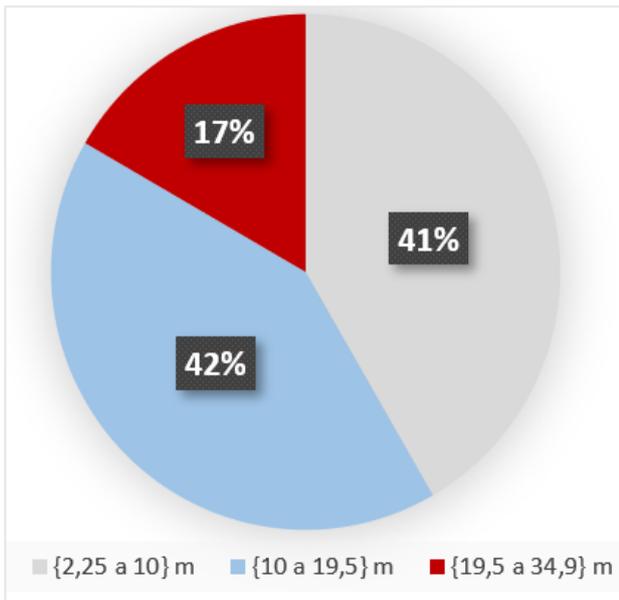


Figure 3.13 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol sableux).

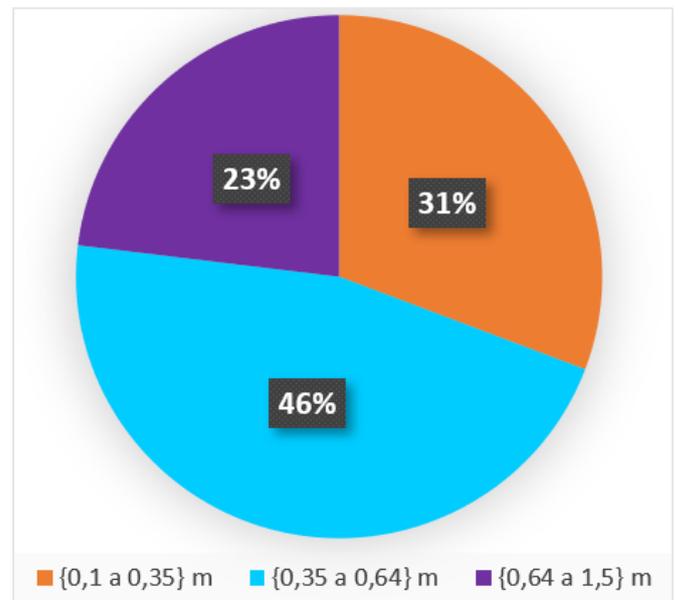


Figure 3.14 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol sableux).

- La figure si dessus montrent qu'il y a 34 % sont à la base de l'essai CPT/SPT, 33 % sont à la base de l'essai CPT/PMT, et 10 % sont à la base de l'essai CPT.

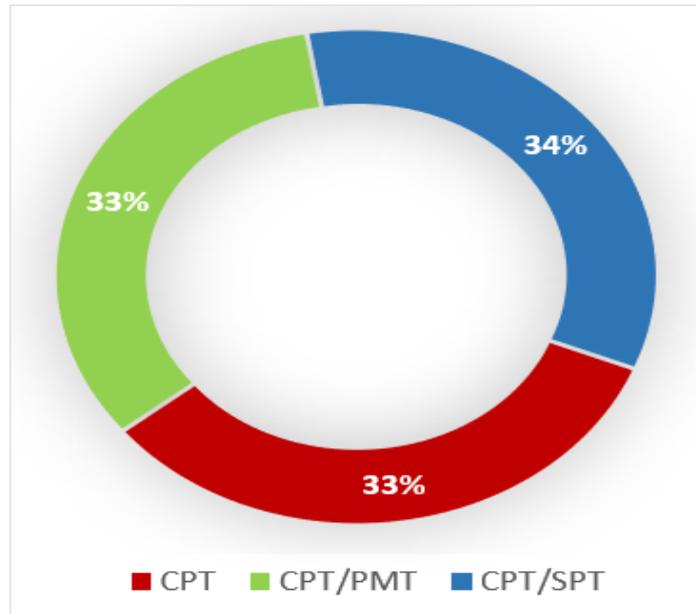


Figure 3.15 : Distribution en pourcentage selon le type de l'essai In-situ (sol sableux).

3.6 Description des essais de chargement dans un sol argileux :

Les essais in-situ réalisés sur un sol argileux sont comme suit :

Les figures si dessus montre que 100 % des pieux d'essais sont en béton armé et pour le mode d'installation on a 62 % des pieux d'essais sont installés par battage, 13 % par vissage et fonçage, et 12 % installés par forage comme montre dans la figure 3.16 et 3.17.

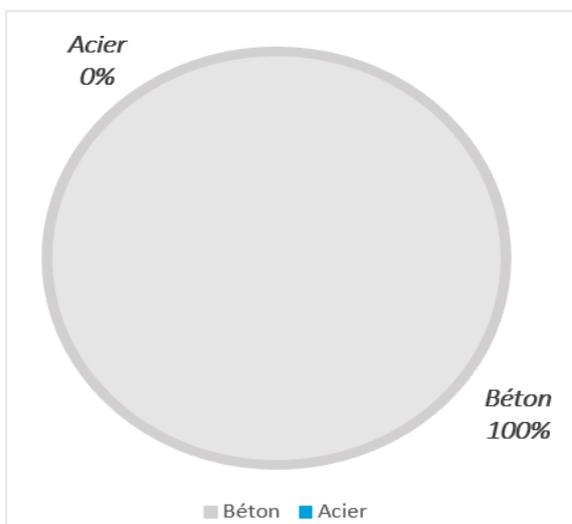


Figure 3.16 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol argileux).

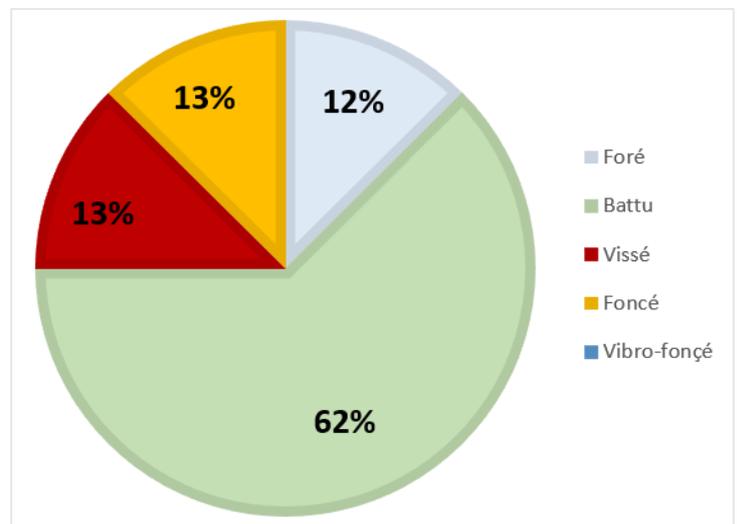


Figure 3.17 : Distribution en pourcentage Le mode de mise en place du pieu.

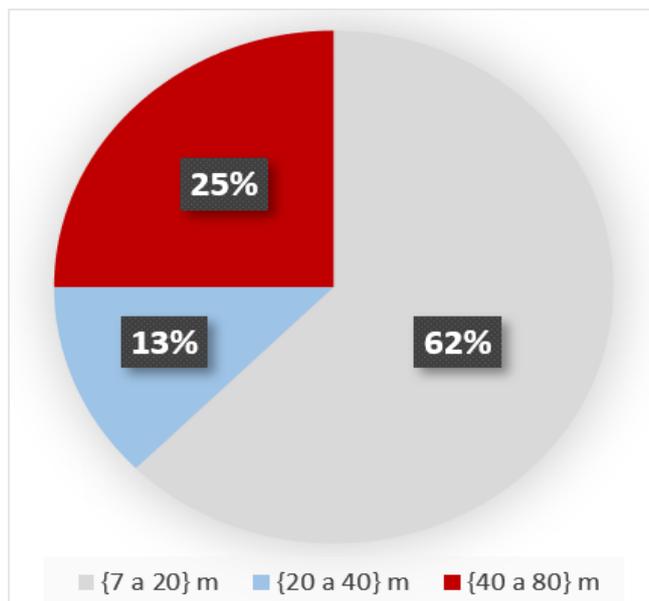


Figure 3.18 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol argileux).

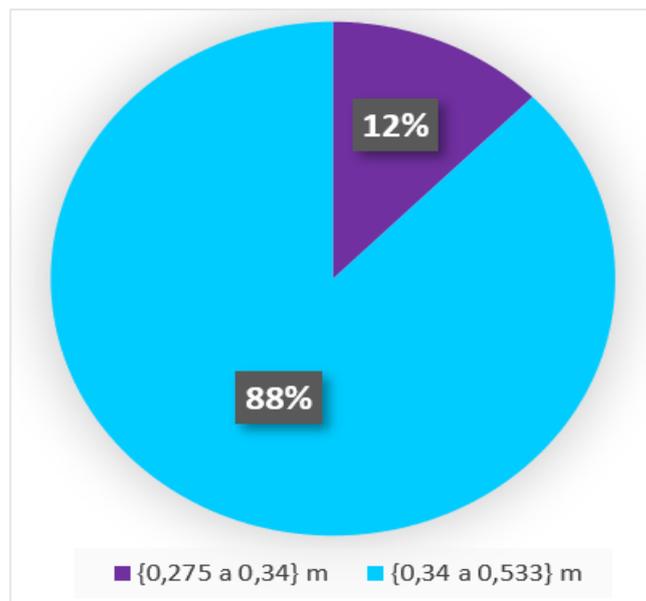


Figure 3.19 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol argileux).

- La figure ci-dessous montrent qu'il y a 50 % sont à la base de l'essai CPT, 50 % sont à la base de l'essai CPT/PMT.

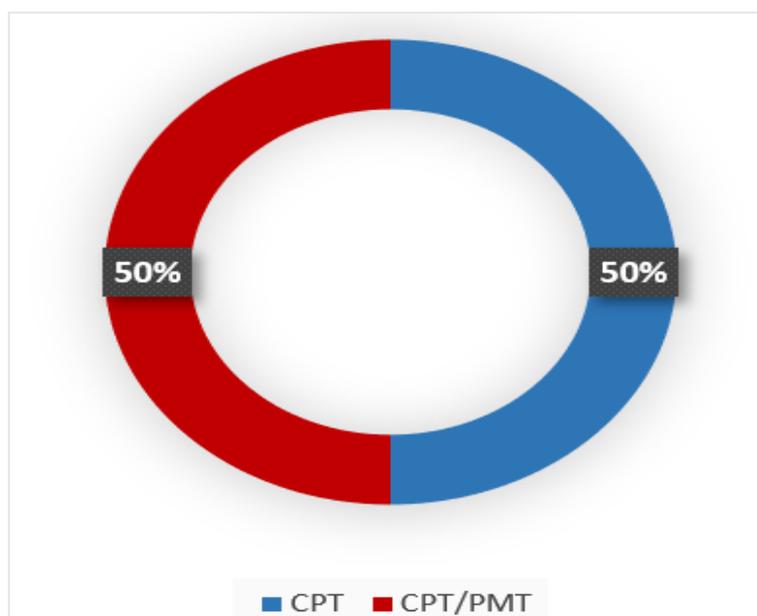


Figure 3.20 : Distribution en pourcentage selon le type de l'essai In-situ (sol argileux).

3.7 Conclusion :

Ce chapitre présente la description de la base de données d'essais de chargement vertical statiques des pieux isolés. La présentation de la base des données a montré que les essais sont localisés sur 18 pays, avec 32 sites d'essai de chargement dont 12 sont des sols sableux et 8 sont des sols argileux et 30 cas d'essais dont des sols contiennent plusieurs couches (argile, sable, sable limoneux, argile limoneuse ; limon argileux et argile sableux.) , les pieux sont soit en béton armé soit en acier, la plus part des essais in-situ réalisés sont **CPT, PMT, SPT** et installés par un mode de forage, de battage, ou de fonçage et vibrofonçage , avec des diamètres à partir de 0,1 m jusqu'à 3m, et une fiche variant de 2,5 m jusqu'à 80 m, avec deux modes d'installation à savoir Foré et Battu.

Chapitre

04

*Description de la base de
données d'essais de
chargement latéral des
pieux*

4.1 Introduction :

Les essais de chargement latéral des pieux peuvent être collectés à partir de la littérature et intégrés dans une base de données dont l'interprétation révèle de nombreux aspects du comportement réel des pieux.

Ce chapitre décrit des études descriptives des essais de chargement horizontal de pieux en vraie grandeur à divers endroits dans le monde en fonction de la nature de sol (sable, argile, limoneux et multicouche). Dans le premier volet nous allons décrire la répartition des essais de chargement dans le monde, puis au deuxième volet nous présenter une étude statistique des caractéristiques géométriques des pieux testés, les matériaux, et le mode d'installation du pieu.

4.2 Présentation de la base de données :

Dans notre projet, nous avons collecté des essais de chargement latéral de 123 pieux répartis dans 15 pays, (des pays asiatiques, européens, américains et un seul africain), Le plus grand pourcentage par rapport ces pays dans l'Amérique du nord (USA) de 41.46 %, certaines pays inconnues de 13.01 % après l'Europe (France) de 11.38 %, à partir de différentes bases de données comme le montrent la figure 4.1 et le tableau 4.1.

- Parmi ces essais, il y a 50 essais de chargement du pieu sont appliqués sur un sol multicouche, 33 essais appliqués sur un sol sableux, 38 essais de chargement du pieu sont appliqués sur un sol argileux et 02 essais appliqués dans un sol limoneux.

Le tableau 4.2 ci-dessous montre que la longueur des pieux varie de 1 m à 94 m, et le diamètre varie de 0.051 m à 2 m.

- La figure ci-dessous présente la répartition géographique des sites expérimentaux.

Tableau 4.1 : Pays des essais de charge latéral sur pieux collectés.

Pays	Nombre des cas	Pourcentage des cas (%)
France	14	11.38
Portugal	1	0.81
Pays-Bas	1	0.81
Finlande	1	0.81
Kuweit	2	1.63
USA	51	41.46
Canada	8	6.50
Singapore	3	2.44
Algérie	1	0.81
Suisse	1	0.81
Grèce	7	5.69
Royaume-Uni	5	4.07
Japon	5	4.07
Roumanie	7	5.69
Inconnu	16	13.01

Tableau 4.2 : Gamme de longueurs de cas et nombre de cas dans le sol multicouche
Sable, l'argile et limon.

Catégories		Diamètre de pieu (m)
Gamme de longueur de pieux		1 - 94
Gamme de diamètre de pieux		0.051 - 2
Nombre de cas		123
Type de sol	Multicouche	50
	Sable	33
	Argile	38
	Limon	02

4.2.1 Sites d'essais :

La base de données présente 123 cas d'essais de chargement latéral sur 90 sites répartis dans le monde, avec 50 cas d'essais dans un sol multicouche, 33 sont sableux, 38 sont argileux et 02 cas d'essais dans un sol limoneux.

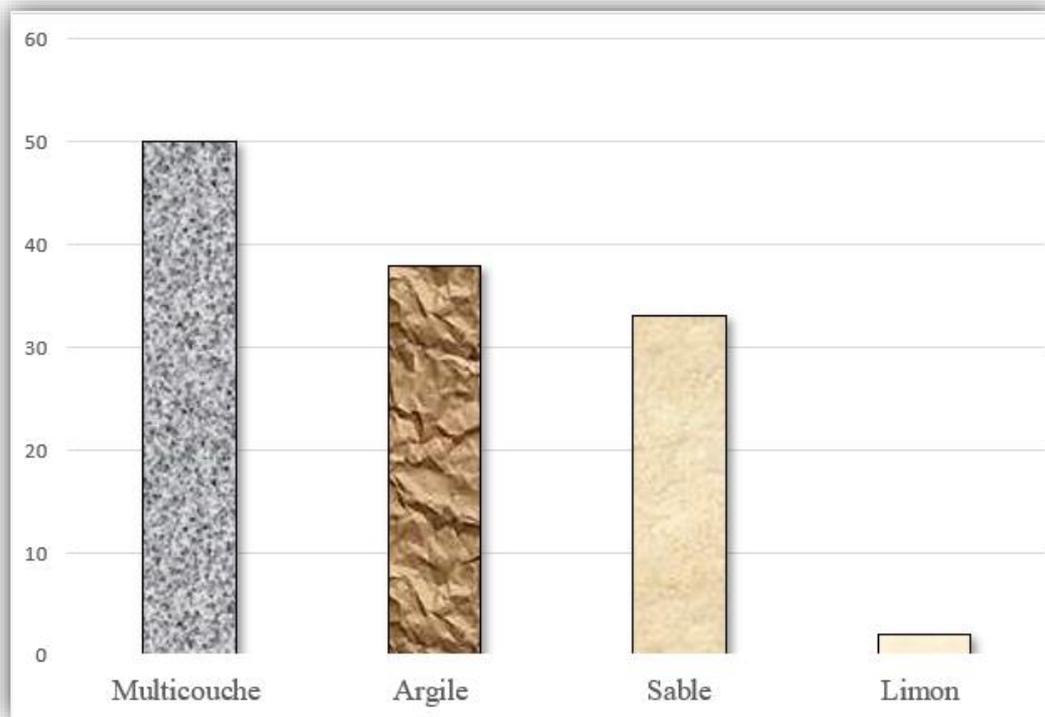


Figure 4.2 : Distribution en histogramme des essais de chargement selon la nature de sol.

4.3 Description des essais de chargement dans le sol multicouche :

Les essais in-situ réalisés sur un sol multicouche sont comme suit :

La figure ci-dessus montre que 50 % des pieux d'essais sont en acier, 30 % sont en béton armé, 8 % béton, 6 % béton précontraint, 4 % non mentionnés et 2 % bois, et pour le mode d'installation on a 46 % des pieux d'essais sont installés par battage, 44 % par forage, 10 % fonçage comme montre dans la figure 4.3 et 4.4.

4.3.1. Matériau et le mode d'installation du pieu :

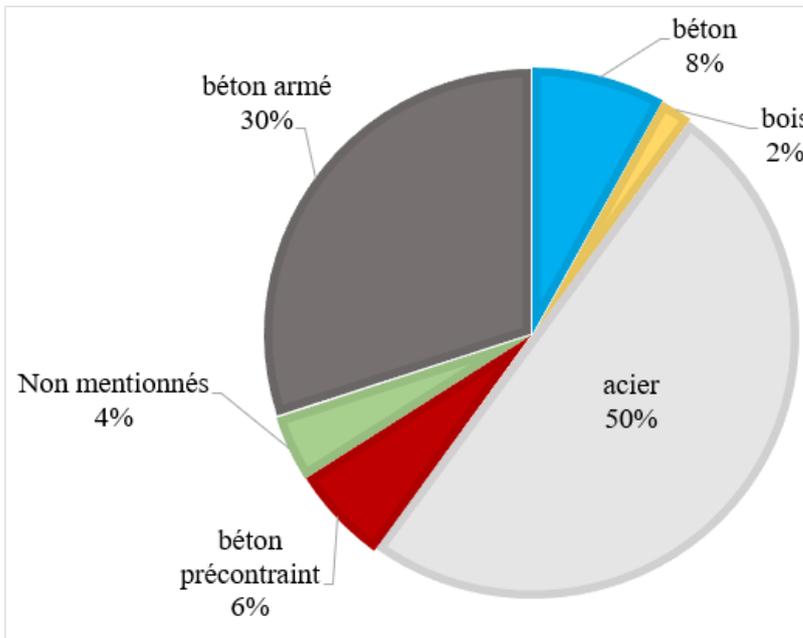


Figure 4.3 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol multicouche).

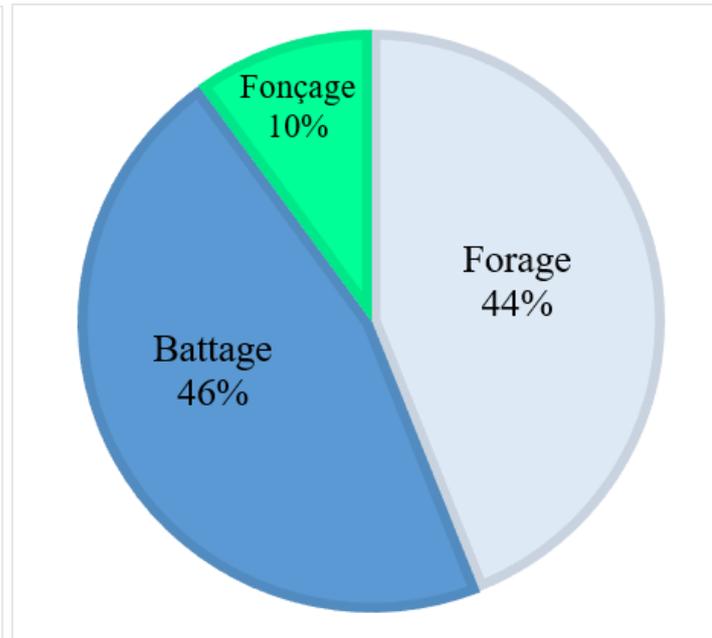


Figure 4.4 : Distribution en pourcentage Selon Le mode d'installation du pieu.

4.3.2. La fiche et diamètre du pieux :

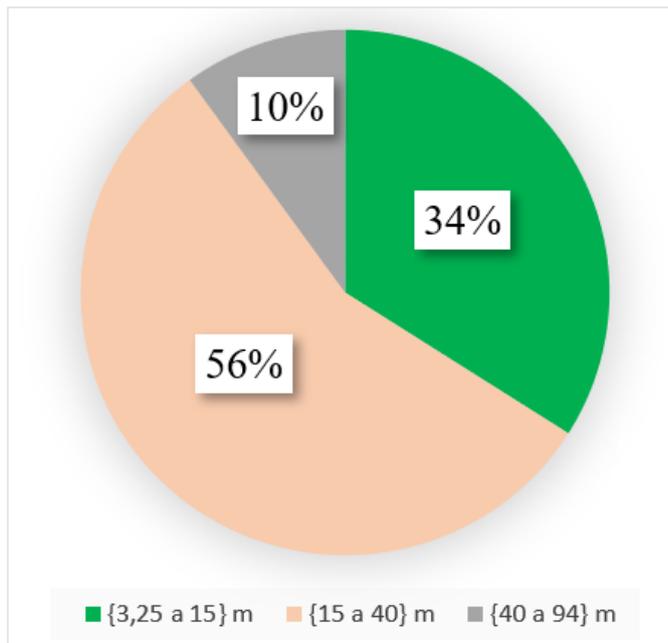


Figure 4.5 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol multicouche).

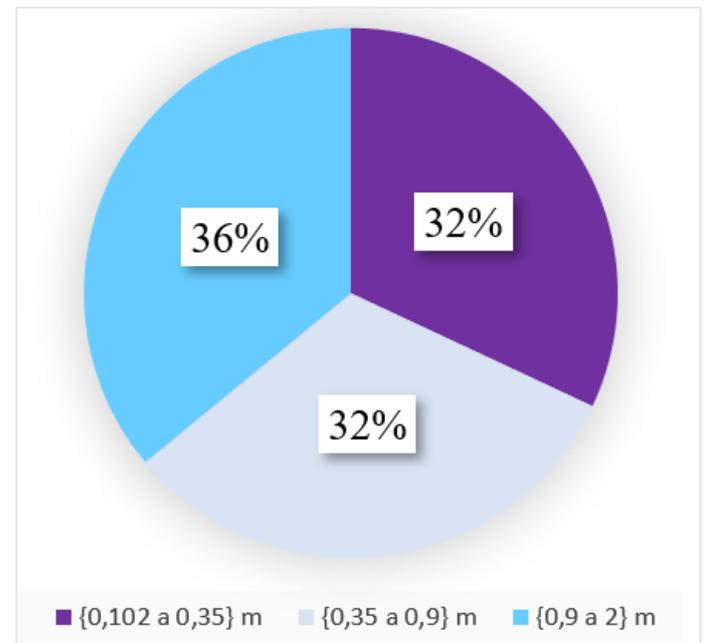


Figure 4.6 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol multicouche).

4.3.3. Forme de la section des pieux :

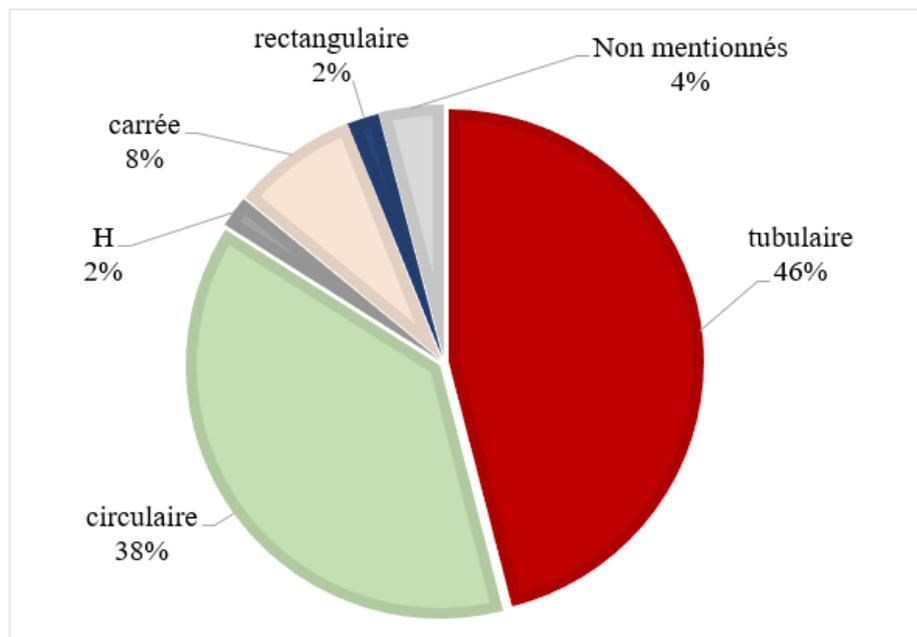


Figure 4.7 : Distribution en pourcentage des pieux selon la forme géométrique de leurs sections (sol multicouche).

4.4 Description des essais de chargement dans un sol sableux :

Les essais in-situ réalisés sur un sol sableux sont comme suit :

La figure ci-dessus montre que 55 % des pieux d'essais sont en acier, 18 % sont en béton, 15 % béton précontraint, 6 % béton armé et 3 % dans les deux cas acier rempli béton et acier rempli coulis, et pour le mode d'installation on a 70 % des pieux d'essais sont installés par battage, 12 % par forage, 9 % fonçage, 6 % jette et un pourcentage de 3 % par battage et fonçage comme montre dans la figure 4.8 et 4.9.

4.4.1. Matériau et le mode d'installation du pieu :

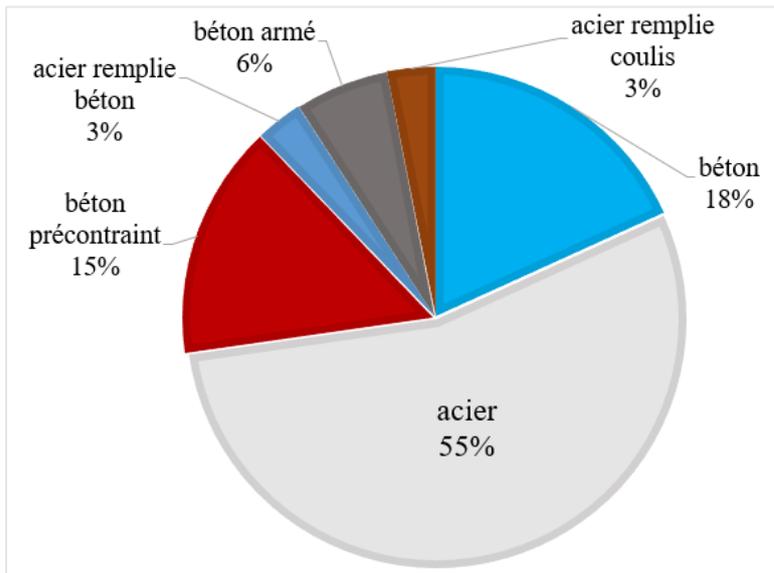


Figure 4.8 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol sableux).

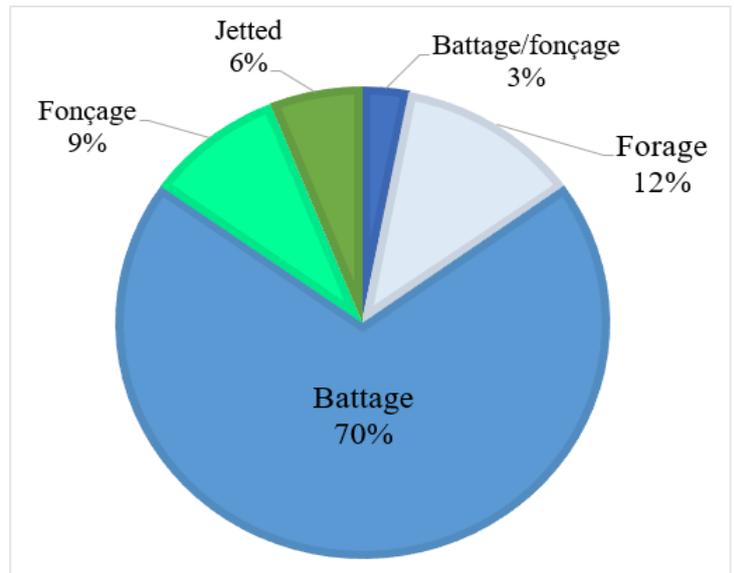


Figure 4.9 : Distribution en pourcentage Le mode d'installation du pieu.

4.4.2. La fiche et diamètre du pieu :

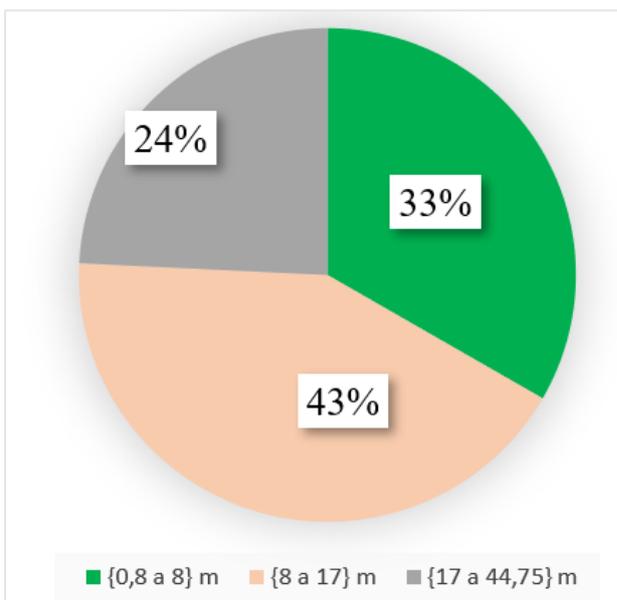


Figure 4.10 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol sableux).

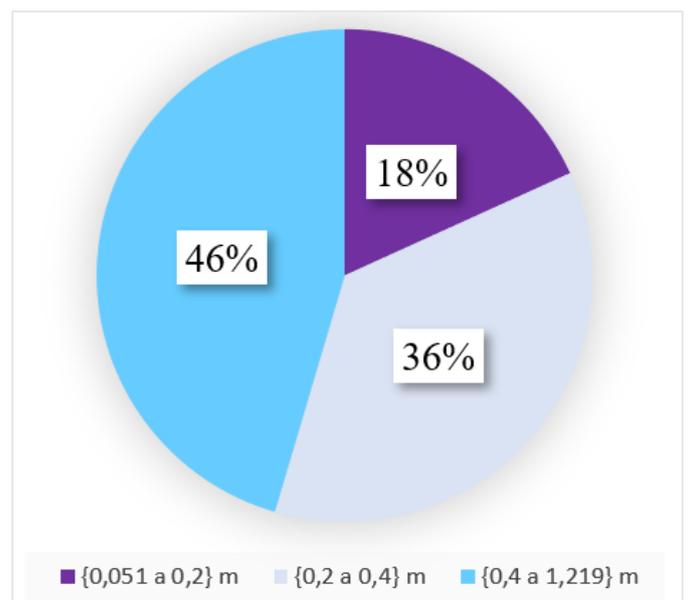


Figure 4.11 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol sableux).

4.4.3. Forme de la section des pieux :

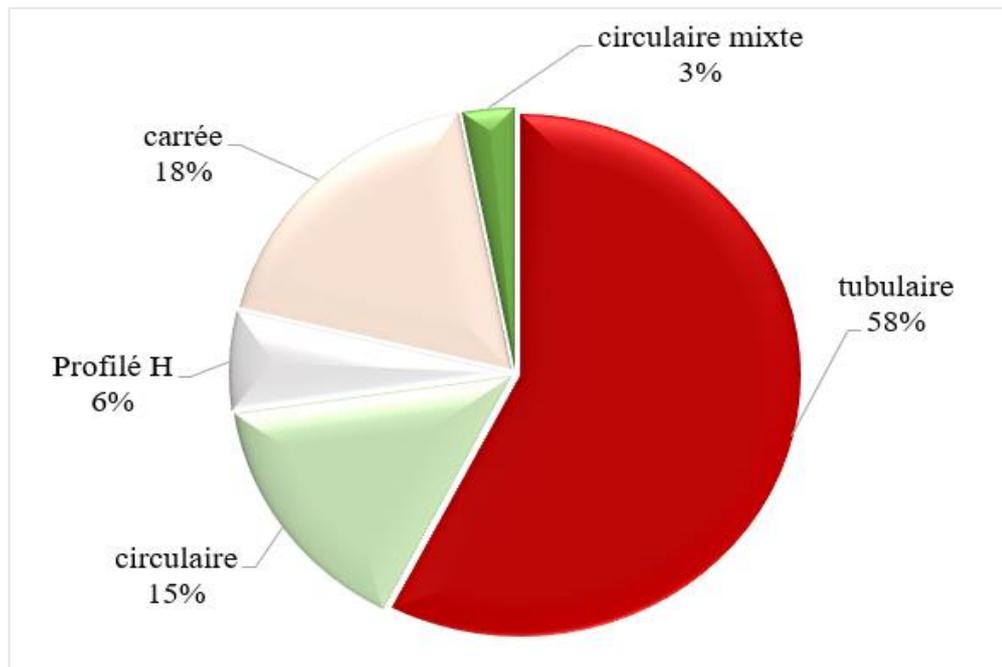


Figure 4.12 : Distribution en pourcentage des pieux selon la forme géométrique de leurs sections (sol sableux).

4.5 Description des essais de chargement dans un sol argileux :

Les essais in-situ réalisés sur un sol argileux sont comme suit :

La figure ci-dessus montre que 63 % des pieux d'essais sont en acier, 29 % sont en béton, 5 % en bois et 3 % non mentionné, et pour le mode d'installation on a 69 % des pieux d'essais sont installés par battage, 21 % par forage et 5 % sont installés par forage et vérinage comme montre dans la figure 4.13 et 4.14.

4.5.1. Matériau et le mode d'installation du pieu :

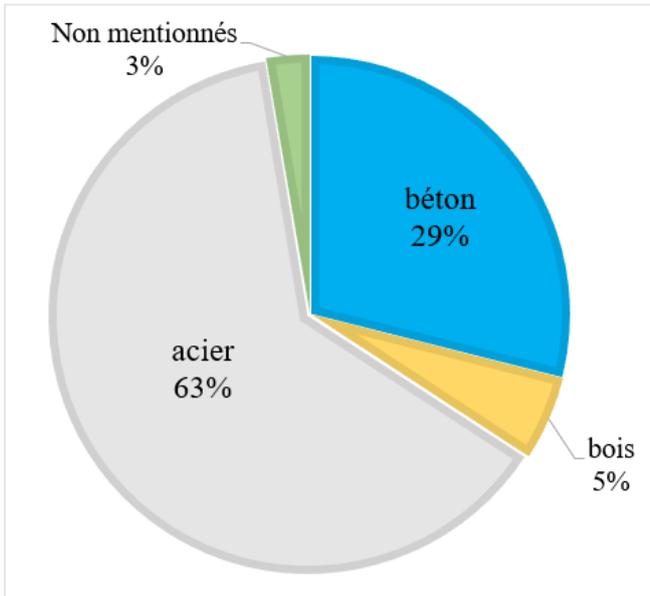


Figure 4.13 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol argileux).

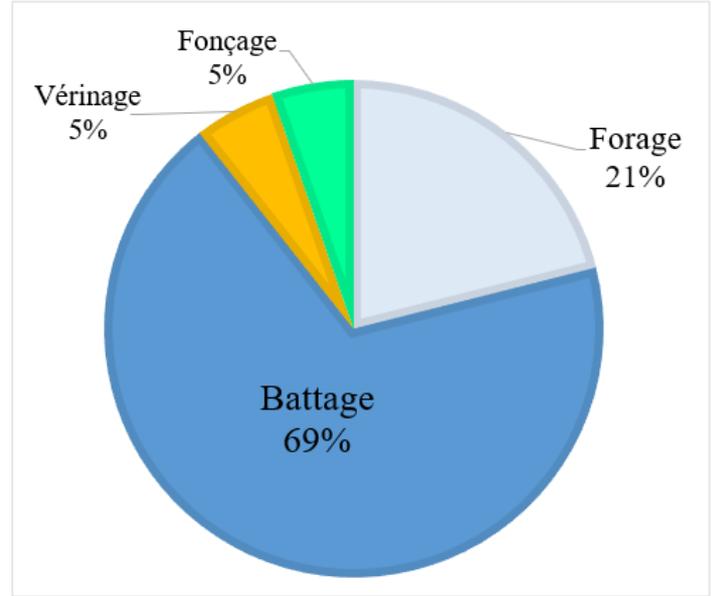


Figure 4.14 : Distribution en pourcentage Le mode d'installation du pieu.

4.5.2. La fiche et diamètre du pieux :

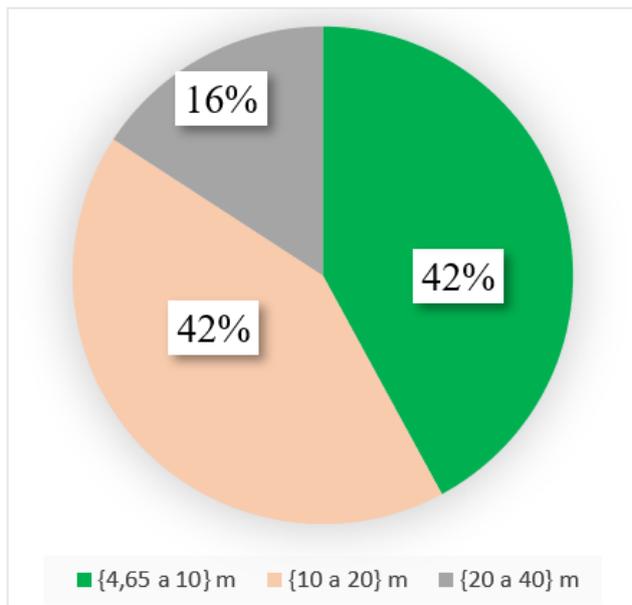


Figure 4.15 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol argileux).

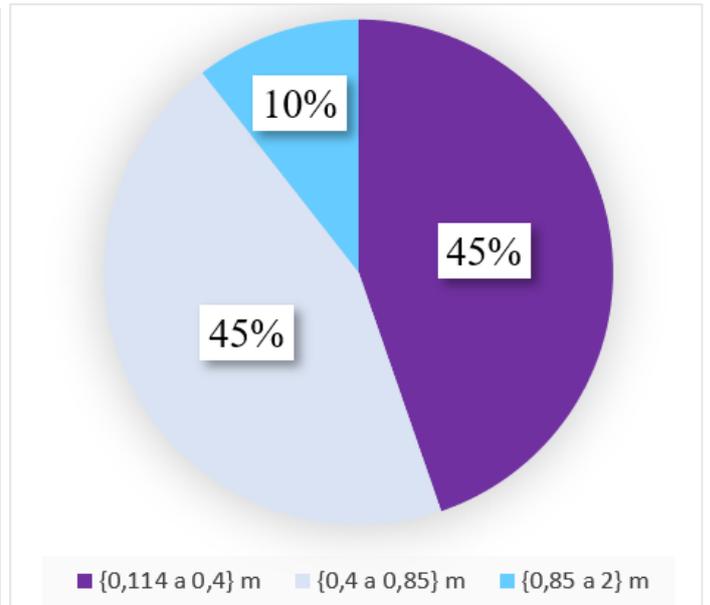


Figure 4.16 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol argileux).

4.5.3. Forme de la section des pieux :

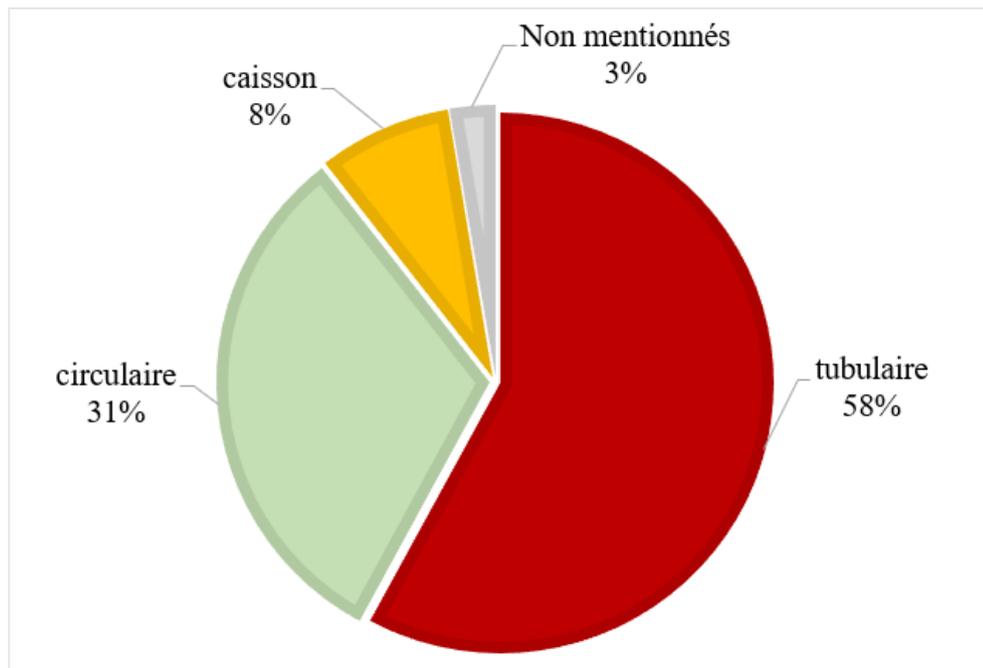


Figure 4.17 : Distribution en pourcentage des pieux selon la forme géométrique de leurs sections (sol argileux).

4.6 Description des essais de chargement dans le sol limoneux :

Les essais in-situ réalisés sur un sol multicouche sont comme suit :

La figure ci-dessus montre que 100 % des pieux d'essais sont en acier, et pour le mode d'installation on a aussi pourcentage de 100 % des pieux d'essais sont installés par battage comme montre dans la figure 4.18 et 4.19. .

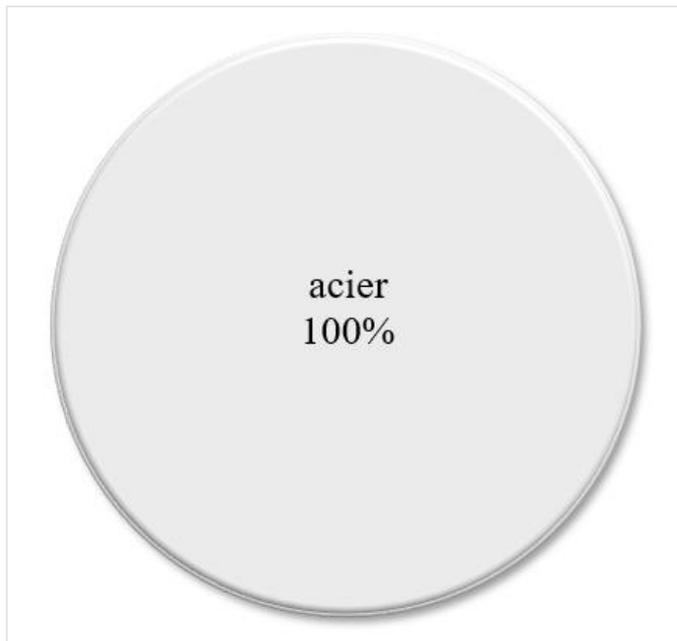
4.6.1. Matériau et le mode d'installation du pieu :

Figure 4.18 : Distribution en pourcentage selon le matériau du pieu (sol limoneux).

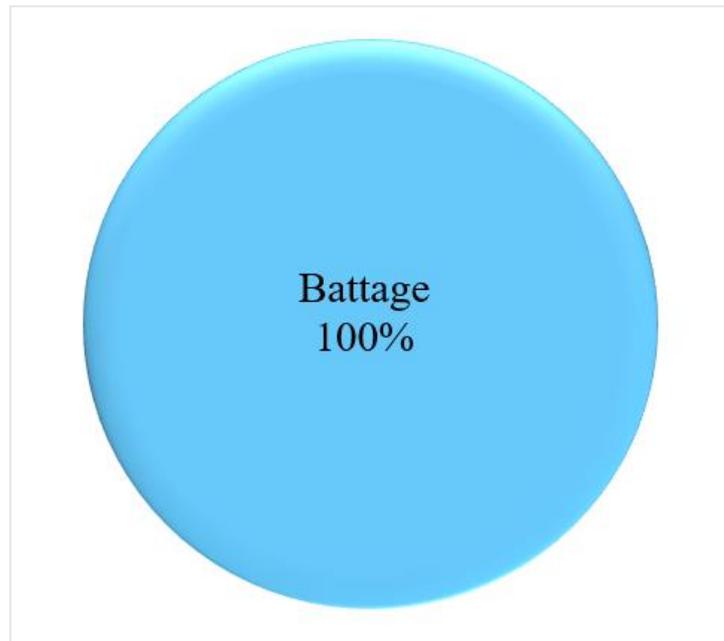


Figure 4.19 : Distribution en pourcentage Selon Le mode d'installation du pieu.

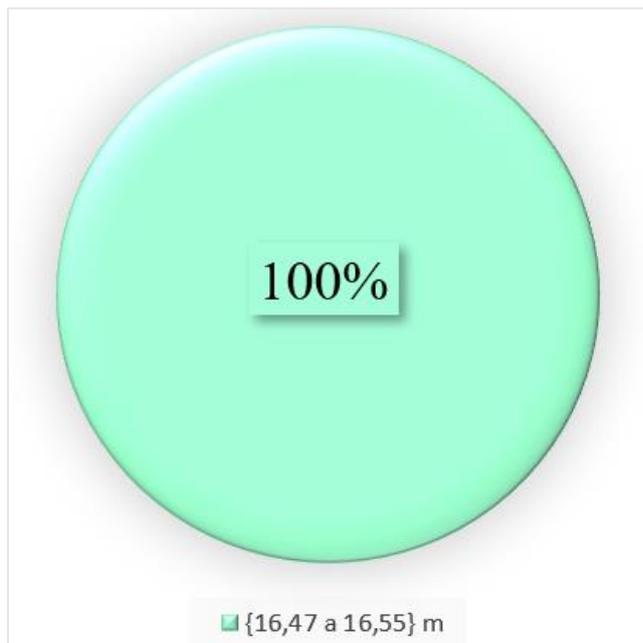
4.6.2. La fiche et diamètre du pieux :

Figure 4.20 : Distribution en pourcentage Selon la fiche du pieu (Sol limoneux).

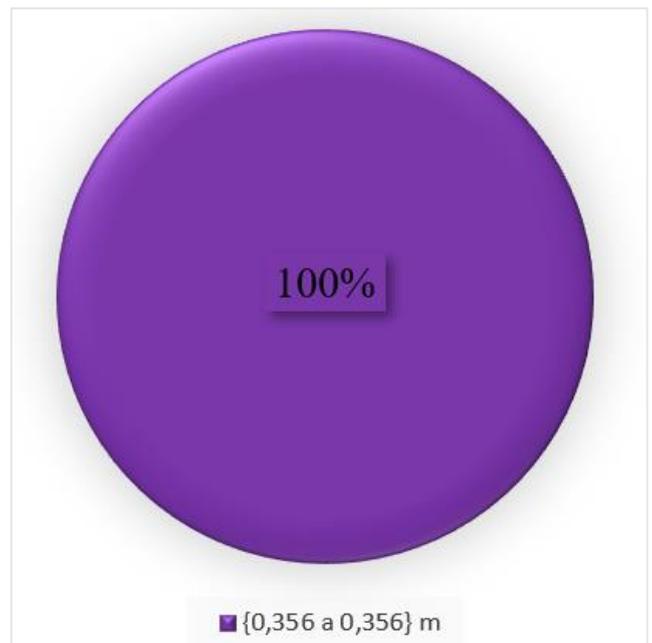


Figure 4.21 : Distribution en pourcentage Selon le diamètre du pieu (Sol limoneux).

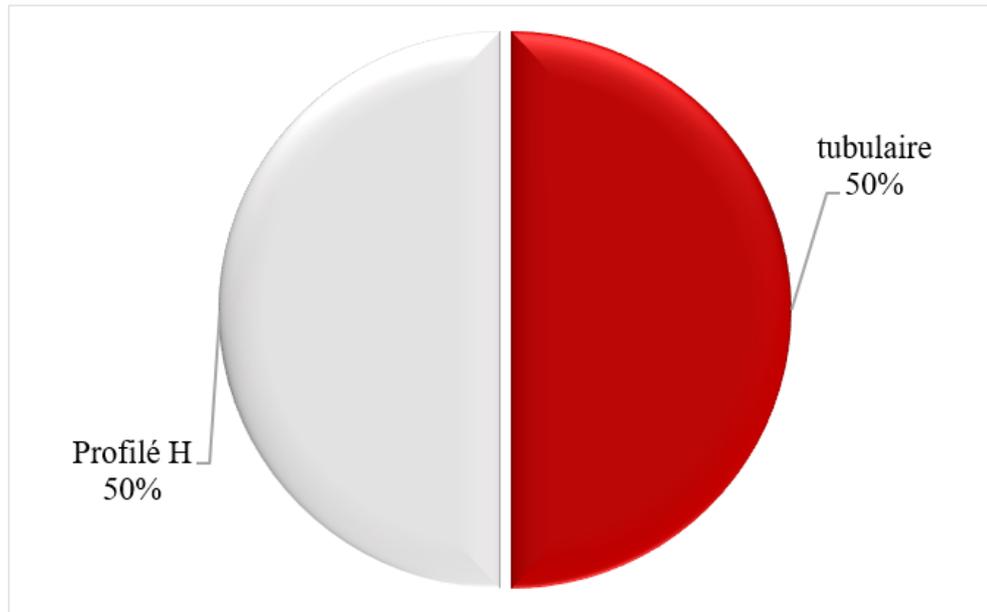
4.6.3. Forme de la section des pieux :

Figure 4.22 : Distribution en pourcentage des pieux selon la forme géométrique de leurs sections (sol limoneux).

4.7. **Les Essais in situ utilisés :**

Selon le tableau 4.3, les essais in-situ couramment utilisés sont le pressiomètre (PMT), le pénétromètre statique (CPT), et l'essai de pénétration standard (SPT).

Tableau 4.3 : Essais in situ réalisés classer selon la nature du sol des sites expérimentaux.

	<i>PMT</i>	<i>CPT</i>	<i>SPT</i>
<i>Multicouche</i>	13	24	28
<i>Sol Argileux</i>	10	14	15
<i>Sol sableux</i>	5	6	26
<i>Sol limoneux</i>	2	-	-
<i>Totale</i>	30	44	69

4.8. Conclusion :

Ce chapitre présente la description de la base de données d'essais de chargement latéral des pieux isolés. La présentation de la base des données a montré que les essais sont localisés sur 15 pays, avec 90 sites d'essai de chargement dont 50 sont des sols multicouche, 38 sont des sols argileux, 33 sableux et 02 cas d'essais dont des sols limoneux, les pieux sont soit en béton armé, bois, béton précontraint soit en acier, la plus part des essais in-situ réalisés sont **CPT**, **PMT**, **SPT** et installés par un mode de forage, de battage, ou de fonçage et vérinage, avec des diamètres à partir de 0,051 m jusqu'à 2 m, et une fiche variant de 0.8 m jusqu'à 94 m, avec des modes d'installation à savoir Foré et Battu ou bien fonçage.

Chapitre

05

*Étude des critères de
capacité portante des pieux*

5.1. Introduction :

L'essai de chargement vertical des pieux est une méthode de dimensionnement coûteuse et lente, qui détermine : le tassement vertical des pieux sous la charge de service, la charge critique ou de fluage et la capacité portante des pieux. Ce chapitre est consacré à l'interprétation des résultats des essais de chargement vertical et à l'analyse statistique des pieux isolés, avec différents critères de capacité portante. Dans un premier volet, nous commencerons par une présentation des différents critères d'estimation de la capacité portante verticale, puis nous passerons à l'interprétation des courbes charge-tassement afin de prédire la capacité portante des pieux, et dans un deuxième volet, nous présenterons une analyse statistique des résultats de différents critères de capacité portante selon la nature de sol (sable, argile et multicouche), nous déterminerons la fréquence d'application de chaque critère et effectuerons ensuite une étude statistique du paramètre appelé rapport de capacité portante, en déterminant sa moyenne, son écart type, le coefficient de variation, sa médiane, et sa marge. En ajustant l'histogramme du rapport de capacité portante par la fonction de probabilité de gauss, on déduit les valeurs de l'écart type σ , la moyenne μ , le coefficient de régression R, et la fréquence relative max de l'histogramme. Après ces derniers paramètres nous allons faire un classement général des critères de capacité portante et recommander une ou plusieurs Critères en fonction de la nature du sol.

5.2. Interprétation des courbes de chargement dans le sable :

L'interprétation des courbes de chargement-tassement par les différents critères précédents permet l'évaluation globale de la capacité portante verticale limite à partir d'un essai de chargement.

5.2.1. Exemple d'Interprétation des courbes de chargement dans un sol sableux :

L'interprétation des courbes de chargement-tassement par les différents critères précédents permet l'évaluation globale de la capacité portante verticale limite à partir d'un essai de chargement. Les courbes de chargement sont tracées utilisant le logiciel d'analyse et de présentation graphique des données Origin Pro version 9.0, ainsi que le programme Curve Expert Professional 2.6 (pour la méthode de Van der Veen).

Les figures ci-dessous représentent un exemple de la courbe de charge-déplacement de l'essai de chargement mené sur un pieu installé par battage, avec plusieurs critères.

Les caractéristiques géométriques pour cet exemple sont comme suivies :

- B (diamètre) = 420mm.
- D (fiche) = 8m.
- $D/B = 19.05$.

Référence :

- Pays : France.
- Localisation : Loon-Plage.
- Ouvrage : Pont.
- Nom de pieu : F4

Tableau 5.1 : L'essai de chargement statique vertical (sable).

1er cycle						
Charge (kN)	83.50	165.92	242.90	327.47	405.00	483.05
Tassement (mm)	0.217	1.084	2.132	3.612	5.598	8.143
2eme cycle						
Charge (kN)	560.57	638.08	721.00	800.12	899.29	978.39
Tassement (mm)	10.851	13.883	17.529	21.752	27.690	33.862

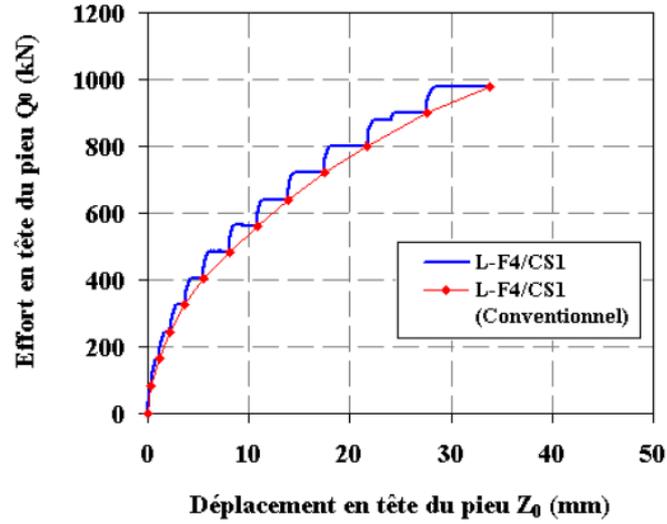


Figure 5.1 : Courbe charge-tassement (Sable).

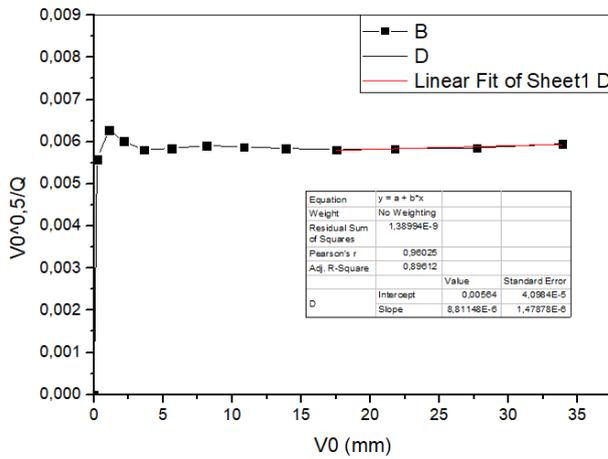


Figure 5.2 : Critère de Hansen (sable).

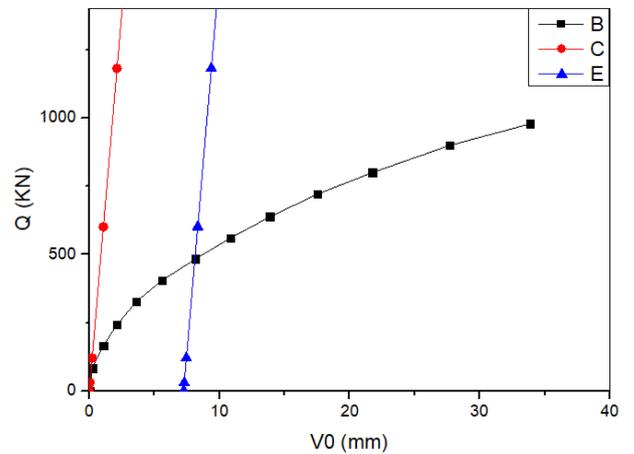


Figure 5.3 : Critère de Davisson (sable).

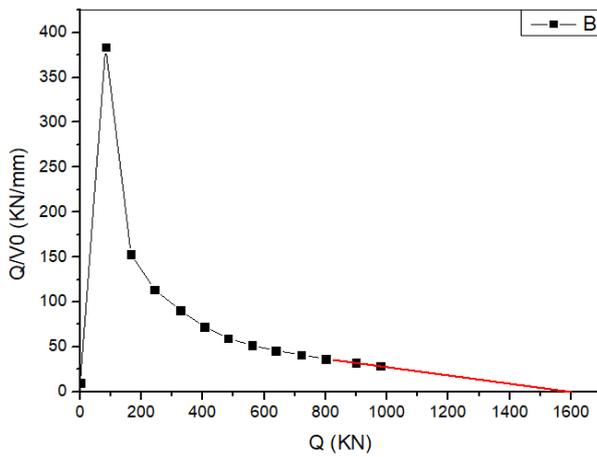


Figure 5.4 : Critère de Décourt (sable).

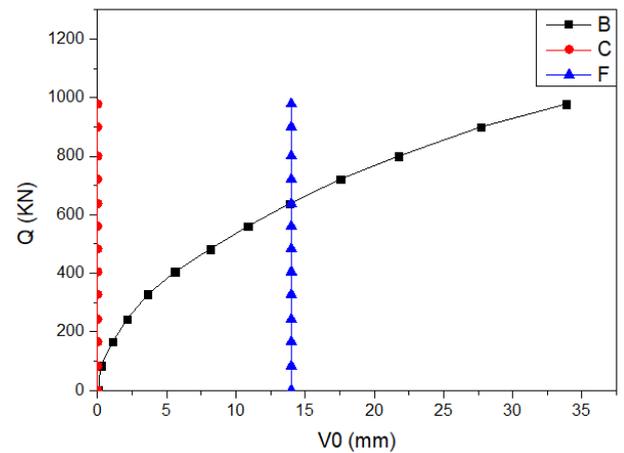


Figure 5.5 : Critère de FDOT (sable).

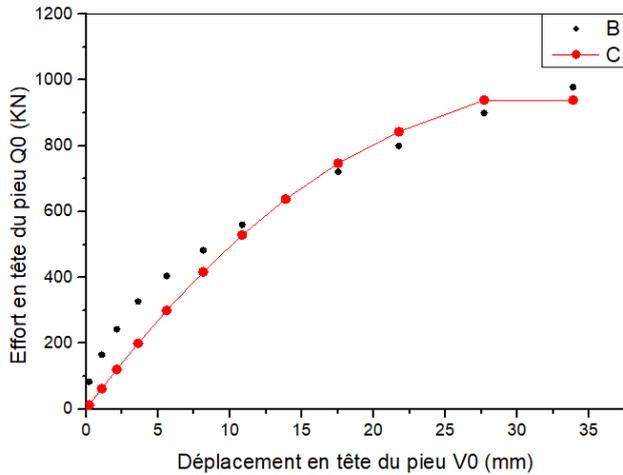


Figure 5.6 : Critère de PARECT (sable).

```

Y=a + b.X          enter 1
Y=X/(a+b.X)       enter 2
Y=a + b.LOG(X)    enter 3
Y=a.X^b           enter 4

2
Number N of points =?
12
Data to be input from file ? (0=1/N=0)
1
Name of Data file ?
F4-A25.txt
initial slope alpha of the curve      135.912900
Horizontal asymptote =      1131.421000
Regression coeff. R=      9.738653E-01
Do you want to compare this function with
a set of data ? (Y=1, N=0)
    
```

Figure 5.7 : Critère d'hyperbolique (sable).

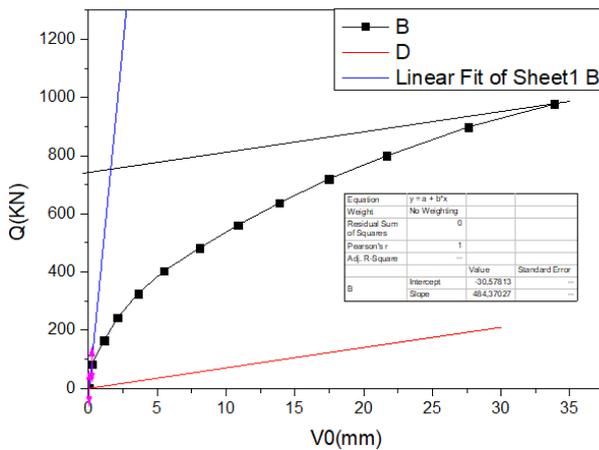


Figure 5.8 : Critère de Bulter et Hoy (sable).

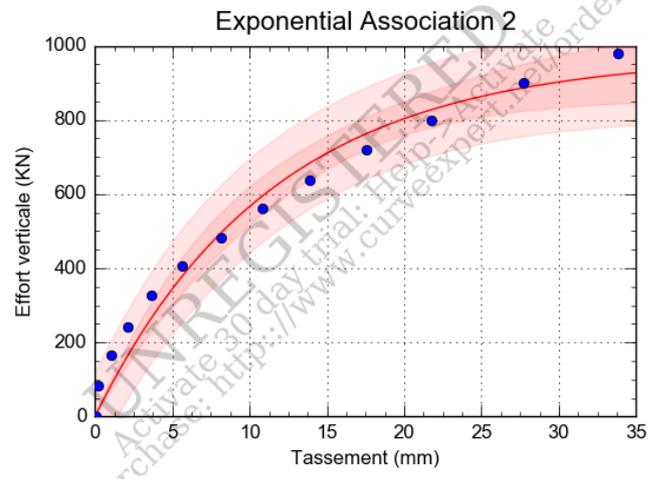


Figure 5.9 : Critère de Van der Veen (sable).

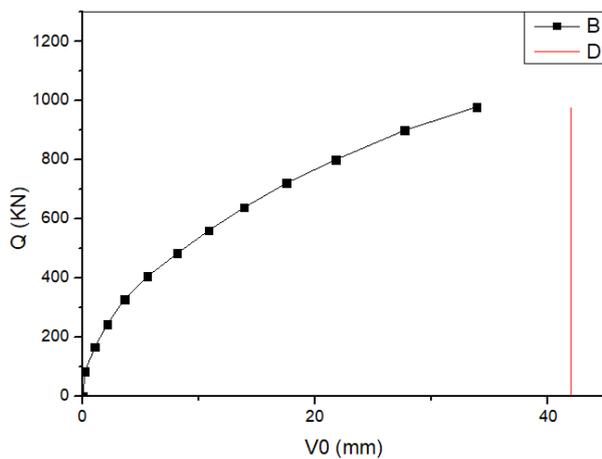


Figure 5.10 : Critère de 10 % B (sable).

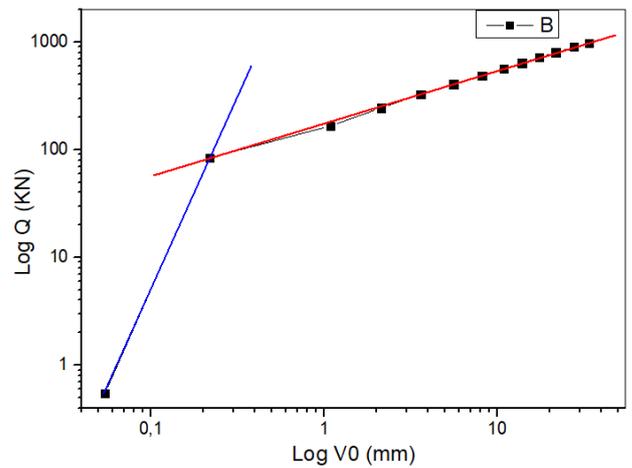


Figure 5.11 : Critère de beer (sable).

- Le critère de 10 % B non applicable car la droite ne passe pas sur la courbe de chargement.

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de la capacité portante vertical de pieu **A25-F4** en kN, En appliquant tous les critères.

Tableau 5.2 : Résultats de capacité portante verticale d'un seul pieu en kN (sable).

Pieu : A25-F4

<i>Critères</i>	Capacité portante (KN)
<i>10% de B</i>	NA
<i>Bulter et Hoy</i>	754.1
<i>Hyperbolique</i>	1131.42
<i>Davisson</i>	483.06
<i>De Beer</i>	83.5
<i>Décourt</i>	1632.52
<i>FDOT</i>	541.8
<i>Fuller et Hoy</i>	742.66
<i>Hansen</i>	2242.88
<i>PARECT</i>	938.84
<i>Van der Veen</i>	973.26

Les résultats de capacité portante vertical dans le pieu P1F-A50 montrent que :

Le critère Hansen présente la plus grande valeur de capacité portante 2242.88 kN, ensuite le critère de décourt de 1632.52 kN, alors que le critère De beer présente la plus petite valeur de capacité portant 83.50 kN.

Le tableau ci-dessous regroupe tous les résultats de la capacité portante verticale des pieux en kN, menés sur la base de données des essais de chargement statique, en appliquant tous les critères.

Tableau 5.3 : Résultats de capacité portante verticale en kN (sable).

Critères	P1F-A50	P2F-A50	P3F-A50	A-24	B-09	P-03
10% de B	316.21	463.52	NA	100.8	NA	7099.71
Bulter et Hoy	226.47	359.31	320.03	56.93	NA	NA
Hyperbolique	326.26	512.67	438.75	127.09	13671.77	7920.34
Davisson	269.22	387.02	365.61	84.7	9585.26	5609.25
De Beer	267,53	362.58	313.01	62.64	7843.42	4769.5
Décourt	338,58	472.59	480.24	152.4	16578.8	10116
FDOT	267,17	371.65	347.25	82.63	11011.6	5857.42
Fuller et Hoy	218.09	336.83	310.84	50.84	NA	NA
Hansen	313.55	464.57	429.87	132.6	14448.8	8810.96
PARECT	286.87	434.02	388.14	113.10	12331.67	6774.33
Van der Veen	289.83	441.51	386.52	112.2	12219.1	6885.79
Critères	F4-A25	A-20-C	A-20-O	P1B-A50	P1V-A50	A-12
10% de B	NA	1493.6	1027.7	571.098	2736.19	1586.7
Bulter et Hoy	754.1	1305.4	825.43	536.81	2655.26	1424.3
Hyperbolique	1131.42	1812.25	1326.18	631.718	3466.83	1941.43
Davisson	483.06	1200.4	702.89	458.96	1724.71	1519.1
De Beer	83.5	1233.4	972.56	514.998	1637.67	1418.1
Décourt	1632.52	1883.4	1392.1	621.308	3954.19	1719.6
FDOT	541.8	1057.8	657.51	428.01	1271.19	984.79
Fuller et Hoy	742.66	1265.9	794.6	530.082	2613.29	1401.5
Hansen	2242.88	1756.5	1272.5	585.796	3512.43	1617.4
PARECT	938.84	1613.62	1129.62	551.342	2700	1505.30
Van der Veen	973.26	1606.1	1138.1	569.286	2852.28	1634.7

5.3. Interprétation des courbes de chargement dans l'argile :

Le tableau ci-dessous regroupe tous les résultats de la capacité portante verticale en kN, menés sur la base de données des essais de chargement statique, en appliquant tous les critères.

Tableau 5.4 : Résultats de capacité portante verticale en kN (argile).

Critères	F1-A25	B1-A25	S1-A25	A-14	A-21	A-27	P2B-A50	A-23-R
10% de B	NA	NA	1224.80	NA	1713.29	1819.84	1741.91	NA
Bulter et Hoy	675.78	1515.26	1075.49	1835.84	1538.53	1724.47	NA	1432,4
Hyperbolique	917.59	2380.72	1290.19	2012.09	1816.77	2109.22	2433.54	1663.49
Davisson	655.75	1526.01	1115.03	1853.32	1528.9	1820.81	1376.88	1468,8
De Beer	524.80	NA	1028.34	1986.12	1608.85	1855.41	NA	1417,3
Décourt	933.15	1319.45	1383.82	1838.72	1745.34	1819.16	1537.98	1573,8
FDOT	758.50	1520.55	1116.30	1709.17	1413.1	874.76	1356.93	1467,3
Fuller et Hoy	656.27	1485.29	1058.9	1826.23	1517.34	1679.91	NA	1405,8
Hansen	788.20	1347.63	1307.26	1856.69	1737.07	1891.19	467.88	1628,5
PARECT	749.43	1429.69	1182.28	1867.10	1627.25	1819.90	2093.22	1501.65
Van der Veen	763.36	1441.68	1220.23	1876.79	1664.56	1912.94	2041.29	1590,6

Les résultats de capacité portante vertical dans le pieu F1-A25 montrent que :

Le critère Bulter et Hoy présente la plus grande valeur de capacité portante 933.15 kN, ensuite le critère hyperbolique de 917.59 kN, alors que le critère de De beer présente la plus petite valeur de capacité portant 524.80 kN.

5.4. Interprétation des courbes de chargement dans le sol multicouche :

Le tableau ci-dessous regroupe tous les résultats de la capacité portante verticale en kN, menés sur la base de données des essais de chargement statique, en appliquant tous les critères.

Tableau 5.5 : Résultats de capacité portante verticale en kN (multicouche).

Critères	A-10	A-17	A-18	A-31	A-32	A-06-S
10% de B	1034,36	NA	3291,83	1311,82	3140,75	1203,85
Bulter et Hoy	901,73	NA	3195,37	1188,29	2969,94	1196,53
Hyperbolique	1269,13	11016,48	4011,46	1343,31	3761,79	1673,07
Davisson	947,57	NA	2171,09	1248,98	2161,84	1107,9
De Beer	919,28	6341,82	3368,96	1111,49	3105,19	936,24
Décourt	1221,58	12663,73	3421,94	1326,81	3499,7	1773,09
FDOT	681,18	NA	1961,7	1234,19	1604,12	976,49
Fuller et Hoy	876,93	NA	3098,98	1146,73	2825,07	1145,37
Hansen	1125,73	9857,53	3399,94	1423,8	3364,75	1547,51
PARECT	1062,71	8236,49	3271,93	1249,38	3226,73	1324,23
Van der Veen	1099,8	8785,71	3377,84	1275,19	3296,83	1362,06

Critères	A-06-B	A-08	A-15	A-13	A-11	A-19
10% de B	1434,15	1310,13	NA	NA	725,2	NA
Bulter et Hoy	1368,01	1187,86	1993,01	NA	583,64	3916,9
Hyperbolique	1911,77	1345,33	2339,56	37054,54	764,66	5034,62
Davisson	1296,72	1250	1986,99	NA	621,3	3823,69
De Beer	1301,33	1114,1	1841,35	4146,18	586,59	3893,39
Décourt	1914,93	1324,88	2745,39	31421,79	773,79	4008,49
FDOT	1067,14	1230,49	2115,84	NA	621,78	NA
Fuller et Hoy	1311,17	1182,8	1978,56	NA	570,2	3897,39
Hansen	1701,55	1398,54	2201,46	NA	750,37	4001,3
PARECT	1540,52	1248,68	2061,9	9957,51	706,67	4007,04
Van der Veen	1582,96	1282,29	2098,4	17111,21	713,92	4203,44

Critères	A-28	A-29-S	A-29-M	A-30-T1	A-30-T2	A-30-T3
10% de B	1626,93	8872,83	NA	NA	40079,48	NA
Bulter et Hoy	1395,71	8622,35	NA	NA	NA	NA
Hyperbolique	2198,72	11895,26	8421,94	66055,18	44646,83	72840,84
Davisson	1400,53	8945,08	NA	NA	20874,28	NA
De Beer	NA	9411,92	1088,04	4921,86	26351,48	NA
Décourt	3101,26	8927,66	11287,79	98288,31	50969,05	92940,77
FDOT	1219,89	5327,55	5744,22	NA	28872,83	NA
Fuller et Hoy	1369,22	8506,74	NA	NA	NA	NA
Hansen	2745,87	8953,49	NA	NA	44229,34	NA
PARECT	1802,52	8610,85	6392,57	39951,85	36216,52	40067,36
Van der Veen	1850,69	9277,69	7136,02	49677,13	36690,57	58726,59

Critères	A-23-K	A-23-R	A-34	A-26	A-09	A-60
10% de B	NA	NA	981,76	793,52	657,22	NA
Bulter et Hoy	1893,78	1432,37	1035,84	919,77	568,78	1478,9
Hyperbolique	2434,59	1663,49	1075,47	750,71	678,39	3485,01
Davisson	1915,94	1468,78	1001,85	828,18	601,39	NA
De Beer	1475,67	1417,34	1267,48	1143,82	518,95	1493,69
Décourt	2291,46	1573,82	841,12	576,07	612,86	1504,42
FDOT	1595,16	1467,28	1002,8	834,1	601,52	NA
Fuller et Hoy	1864,16	1405,78	997,8	898,26	558,15	1443,03
Hansen	2050,26	1628,53	1056,62	798,97	736,04	1501,43
PARECT	1908,2	1501,65	1042,38	851,45	649,39	1482,85
Van der Veen	1982,23	1590,61	1059,47	866,79	649,79	2141,49

Critères	A-05-P3	A-05-P5	A-16-A	A-16-B	A-16-C	A-16-D
10% de B	1259,19	1262,83	NA	NA	NA	NA
Bulter et Hoy	1025,72	956,53	731,96	674,84	842,8	1839,66
Hyperbolique	1326,31	1337,13	958,11	900,55	1106,62	1999,19
Davisson	923,01	890,02	644,22	646,24	738,72	1827,31
De Beer	1018,99	830,47	795,88	686,54	896,63	1869,98
Décourt	1372,34	1482,54	796,89	802,76	1003,6	1857,74
FDOT	907,42	871,15	648,21	650,03	742,02	1807,8
Fuller et Hoy	1018,03	946,01	692,43	638,73	808,15	1835,11
Hansen	1282,12	1315,84	802,02	751,85	948,47	1862,8
PARECT	1095,94	1095,78	781,24	731,67	900,52	1871,1
Van der Veen	1156,96	1145,65	820,62	771,37	921,16	1889,23

Les résultats de capacité portante vertical dans le pieu A-10 montrent que :

- Le critère Hyperbolique présente la plus grande valeur de capacité portante 1269.13 kN, ensuit le critère décourt de 1221.58 kN, alors que le critère de F. Dot présente la plus petite valeur de capacité portant 681.18 kN.

NB :

- La capacité portante verticale selon les critères hyperbolique, Van der Veen et Décourt, est toujours obtenu par l'extrapolation, ces trois méthodes sont les plus applicables.
- Les méthodes de Fuller- Hoy, bulter et Hoy n'est pas applicable dans le premier cas de pieu, ce qui peut pénaliser les longs pieux qui auront des tassements élastiques plus importants que ceux des pieux courts, et donc la droite de pente de 7kN/mm ne peut pas être tangente à la courbe de chargement-déplacement qui n'a pas une forme hyperbolique.

5.5. Analyse statistique et classement des critères :

5.5.1. Présentation des histogrammes d'analyse statistique de chaque critère :

Chaque histogramme donné des valeurs de λ pour un critère est ajusté sur la base de la technique des moindres carrés par la fonction de probabilité de gauss (voir la figure 5.12).

$$Prob(\lambda) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

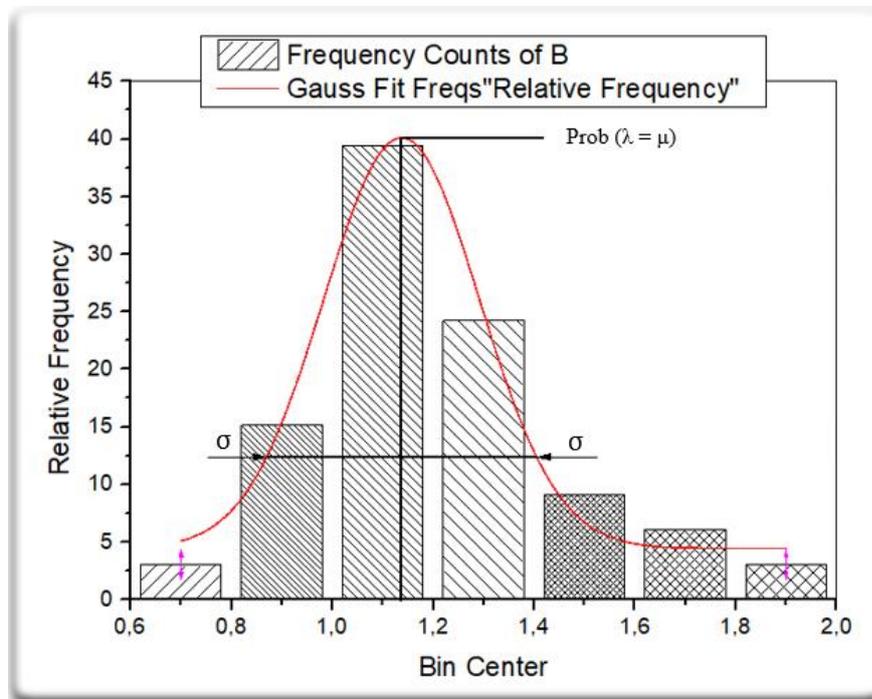


Figure 5.12 : Schéma représentatif par la fonction de probabilité de gauss.

De cet ajustement, on détermine :

- La moyenne μ qui nous indique sur l'exactitude d'une méthode. Si $\mu = 1 \rightarrow$ la méthode est idéalement exacte.
- L'écart type σ qui nous indique sur la précision d'une méthode. Si $\sigma = 0 \rightarrow$ pas de dispersion autour de la valeur $\mu \rightarrow$ méthode est idéalement précise.
- Probabilité max : $prob(\lambda = \mu)$.

Le niveau de prévision de la capacité portante = **prob** ($0.8 < \text{Lambda} < 1.2$).

Dans notre cas, on ne connaît pas la fonction **Prob** (couramment **Prob** = fonction de Gauss), car on ne peut pas ajuster l'histogramme. On revient alors à la définition fondamentale de la probabilité qui égale la fréquence relative = Nombre de cas de ($0.8 < \text{Lambda} < 1.2$) / Nombre total de cas, et on se fixe d'une manière conventionnelle un intervalle tournant autour de 1.

5.6. Analyse statistique et classement des critères dans le sable :

5.6.1. La fréquence d'application des critères :

On définit la « Fréquence d'application » d'un critère par le nombre des cas où le critère est applicable rapporté au nombre total des cas en pourcentage %. Alors qu'une fréquence de 100 % correspond à un critère applicable à tous les cas étudiés, une fréquence nulle correspond à un critère non applicable.

Tableau 5.6 : Résultats de la fréquence d'application des critères (sable).

Critères	10 % de B	Bulter et Hoy	Hyper	Davisson	De beer	Décourt	F. Dot	Fuller et Hoy	Hansen	PARECT	Van der vin
La fréquence (%)	75	83.33	100	100	100	100	100	83.33	100	100	100

Comme le montre le tableau le critère Hyperbolique, Décourt, Van der Veen, Hansen, PARECT, F. Dot, De beer et Davisson représentent les plus grands pourcentages de fréquence 100 %. Les critères de Fuller et Hoy et 10 % B représentent les petits pourcentages de fréquence 80 %, 60 % respectivement.

5.6.2. Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante :

On définit le rapport de capacité portante λ , tel que :

$$\lambda = \frac{Ql(\text{critère})}{Ql(\text{moyenne})}$$

Le tableau 5.7 ci-dessous contient les pourcentages des valeurs de λ supérieure à 1 (sur-estimation) et inférieure à 1 (sous-estimation) pour chaque critère étudié.

Tableau 5.7 : Répartition des valeurs de λ (sable)

Le Critère	Le % des valeurs de λ Supérieures à 1	Le % des valeurs de λ Inférieures à 1
10% de B	75	25
Bulter et Hoy	8.33	91.67
Hyperbolique	100	0
Davisson	0	100
De Beer	0	100
Décourt	100	0
FDOT	0	100
Fuller et Hoy	0	100
Hansen	100	0
PARECT	66.67	33.33
Van der Veen	91.67	8.33

Les critères de Davisson, FDOT, De beer et Fuller et Hoy présentent les plus grands pourcentages des valeurs sous-estimé ($\lambda < 1$) 100 %, donc sont les plus sécuritaires. Les critères de Décourt, Hansen et Hyperbolique présente le grand pourcentage des valeurs sur-estimé ($\lambda > 1$) 100 % des valeurs du rapport $QI(\text{critère}) / QI \text{ moyenne}$ supérieures à 1 ce qui laisse à conclure que presque toutes les capacités portantes déterminées sont surestimées par rapport à la valeur moyenne, alors qu'il présente un pourcentage faible des valeurs sous-estimé Van der veen 8.33 % ($\lambda < 1$).

5.6.3. Étude statistique du rapport de capacité portante :

Le tableau 5.8 ci-dessous présente les résultats de l'étude statistique de λ pour chaque critère.

Le tableau 5.8 : Les résultats de l'étude statistique de λ (sable).

Le Critère	λ moyenne	Écart type	COV (%)	La médiane	La marge
10% de B	1,042	0,041	3,97	1,033	[1.00 ; 1.11]
Bulter et Hoy	0,848	0,118	13,97	0,852	[0.58 ; 1.00]
Hyperbolique	1,209	0,073	6,01	1,206	[1.12 ; 1.31]
Davisson	0,815	0,144	17,69	0,828	[0.51 ; 1.00]
De Beer	0,746	0,244	32,75	0,832	[0.09 ; 0.95]
Décourt	1,336	0,187	14,00	1,317	[1.12 ; 1.71]
FDOT	0,763	0,151	19,75	0,800	[0.48 ; 0.94]
Fuller et Hoy	0,820	0,131	16,02	0,813	[0.52 ; 0.99]
Hansen	1,281	0,352	27,44	1,187	[0.06 ; 2.35]
PARECT	1,032	0,058	5,61	1,016	[0.95 ; 1.16]
Van der Veen	1,052	0,050	4,78	1,042	[0.97 ; 1.15]

Il est remarquable, d'après l'analyse statistique de λ illustrée au tableau 5.8, que :

Les valeurs de λ moyenne sont comprises entre 0.746 et 1.336. Le coefficient de variation COV paraît un pourcentage variant entre 3.97 % et 32.75 %, ce qu'explique une dispersion variable d'un critère à l'autre, le critère de 10% de B donne la plus faible dispersion 3.97 %, et le critère de De beer donne la plus grand dispersion 32.75 %. Le critères Hansen présentent la plus grande marge et donc la plus grand d'écart type (SD).

Le tableau 5.8 ci-dessous présente les résultats des paramètres statistiques.

On peut voir que les valeurs μ moyennes pour les critères PARECT et 10 % de B sont les plus proche de 1, 1.032 et 1.042 (exactitude idéale), respectivement. Les valeurs de coefficient de variation pour les critères de 10 % de B et van der veen sont les plus proches de zéro à 3.97 et 4.76, respectivement (bonne exactitude).

5.6.4. Classement général des critères de capacité portante :

Le classement est établi selon les paramètres statistiques étudiés précédente.

5.6.4.1. Classement des critères selon la fréquence d'application :

Le tableau 5.9 ci-dessous présente le classement des critères de capacité portante selon la fréquence d'application en %.

Tableau 5.9 : Classement des critères selon la fréquence d'application (sable).

Les Critères	La fréquence D'application en %	Le classement
Van der Veen	100	1 ^{ère}
PARECT	100	1 ^{ère}
Bulter et Hoy	100	1 ^{ère}
De Beer	100	1 ^{ère}
FDOT	100	1 ^{ère}
Décourt	100	1 ^{ère}
Hansen	100	1 ^{ère}
Hyperbolique	100	1 ^{ère}
10% de B	83.33	2 ^{ème}
Fuller et Hoy	83.33	2 ^{ème}
Davisson	75.00	3 ^{ème}

Les critères de Van der veen, **PARECT**, **Bulter et Hoy**, **Hansen**, **F. Dot**, **De beer**, **Hyperbolique** et **Décourt** présentes les plus grands pourcentages de fréquence 100 %, alors est les premiers aux classements selon la fréquence d'application.

5.6.4.2. Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude) :

Le tableau 5.10 regroupe le classement des critères de capacité portante selon la moyenne.

Tableau 5.10 : Classement des critères selon la moyenne μ (sable).

Les Critères	La moyenne μ	Le classement
PARECT	1.032	1 ^{ère}
10% de B	1.042	2 ^{ème}
Van der Veen	1.052	3 ^{ème}
Bulter et Hoy	0.848	4 ^{ème}
Fuller et Hoy	0.820	5 ^{ème}
Davisson	0.815	6 ^{ème}
Hyperbolique	1.209	7 ^{ème}
FDOT	0.763	8 ^{ème}
De Beer	0.746	9 ^{ème}
Hansen	1.281	10 ^{ème}
Décourt	1.336	11 ^{ème}

Le critère **PARECT** présente la valeur la plus proche à 1 (exactitude idéale), de 1.032, est donc le premier au classement selon l'exactitude.

5.6.4.3. Classement des critères selon le coefficient de variation - COV - (précision) :

Le tableau 5.11 regroupe le classement des critères de capacité portante selon l'écart type.

Tableau 5.11 : Classement des critères selon le coefficient de variation (sable).

Les Critères	COV	Le classement
10% de B	3.97	1 ^{ère}
Van der Veen	4.78	2 ^{ème}
PARECT	5.61	3 ^{ème}
Hyperbolique	6.01	4 ^{ème}
Bulter et Hoy	13.97	5 ^{ème}
Décourt	14.00	6 ^{ème}
Fuller et Hoy	16.02	7 ^{ème}
Davisson	17.69	8 ^{ème}
FDOT	19.75	9 ^{ème}
Hansen	27.44	10 ^{ème}
De Beer	32.75	11 ^{ème}

Le critère **10 % de B** présente la valeur la plus proche de zéro (précision idéale), de 3.97, est donc le premier au classement selon la précision.

5.6.4.4. Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la capacité portante (N_p) :

Le tableau 5.12 présente le classement des critères selon la probabilité.

Tableau 5.12 : Classement selon le niveau de prévision (sable).

Les Critères	Niveau de prévision	Le classement
10% de B	100	1 ^{ère}
PARECT	100	1 ^{ère}
Van der Veen	100	1 ^{ère}
Bulter et Hoy	70	2 ^{ème}
Fuller et Hoy	60	3 ^{ème}
Davisson	58	4 ^{ème}
De Beer	58	4 ^{ème}
Hansen	58	4 ^{ème}
Hyperbolique	50	5 ^{ème}
FDOT	50	5 ^{ème}
Décourt	33	6 ^{ème}

Les critères de **Van der veen**, **10 % de B** et **PARECT** présentes les meilleures valeurs été égale à 100 %, est donc le premier au classement selon le niveau de prévision.

5.6.4.5. Classement général des critères de capacité portante :

Le tableau 5.13 présente le classement général des critères de capacité portante selon la sommation de tous les classements précédents.

Tableau 5.13 : Classement général des critères (sable).

Les Critères	Somme des classements	Le classement
10% de B	6	1 ^{ère}
PARECT	6	1 ^{ère}
Van der Veen	7	2 ^{ème}
Bulter et Hoy	12	3 ^{ème}
Fuller et Hoy	17	4 ^{ème}
Hyperbolique	17	4 ^{ème}
Davisson	21	5 ^{ème}
FDOT	23	6 ^{ème}
Décourt	24	7 ^{ème}
De Beer	25	8 ^{ème}
Hansen	25	8 ^{ème}

D'après le tableau 5.13, le classement général des critères montre que les critères de **PARECT** et **10 % de B** est le premier. Il est le meilleur critère de capacité portante dans le sable.

5.7. Analyse statistique et classement des critères dans l'argile :

5.7.1. La fréquence d'application des critères :

Le tableau 5.14 ci-dessous présente les résultats de la fréquence en %, à partir des différents critères.

Tableau 5.14 : Résultats de la fréquence d'application des critères (argile).

Critères	10 % B	Bulter et Hoy	Hyper	Davisson	De beer	Décourt	F. Dot	Fuller et Hoy	Hansen	PARECT	Van der vin
La fréquence (%)	50	87.5	100	100	75	100	100	87.5	100	100	100

Comme le montre le tableau le critère Hyperbolique, Décourt, Van der Veen, Hansen, PARECT, F. Dot et Davisson représentent les plus grands pourcentages de fréquence 100 %. Le critères 10 % B représentée le petit pourcentage de fréquence 50 %.

5.7.2. Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante

Le tableau 5.15 ci-dessous contient les pourcentages des valeurs de λ supérieure à 1 (sur-estimation) et inférieure à 1 (sous-estimation) pour chaque critère étudié.

Tableau 5.15 : Répartition des valeurs de λ (argile).

Le Critère	Le % des valeurs de λ Supérieures à 1	Le % des valeurs de λ Inférieures à 1
10% de B	50	50
Bulter et Hoy	0	100
Hyperbolique	100	0
Davisson	12.5	87.5
De Beer	25	75
Décourt	62.5	37.5
FDOT	12.5	87.5
Fuller et Hoy	0	100
Hansen	62.5	37.5
PARECT	62.5	37.5
Van der Veen	87.5	12.5

Les critères de Bulter et Hoy et Fuller et Hoy présentent les plus grands pourcentages des valeurs sous-estimé ($\lambda < 1$) 100 %, donc sont les plus sécuritaires.

- Le critère Hyperbolique présente le grand pourcentage des valeurs sur-estimé ($\lambda > 1$) 100 % des valeurs du rapport $QI(\text{critère}) / QI \text{ moyenne}$ supérieures à 1 ce qui laisse à conclure que presque toutes les capacités portantes déterminées sont surestimées par rapport à la valeur moyenne.
- Les critères qu'ils présentent un pourcentage faible des valeurs inférieure ($\lambda < 1$) Van der veen, et supérieur ($\lambda > 1$) F. Dot et Davisson 12.5 %.

5.7.3. Étude statistique du rapport de capacité portante :

Le tableau 5.16 ci-dessous présente les résultats de l'étude statistique de λ pour chaque critère.

Le tableau 5.16 : Les résultats de l'étude statistique de λ (argile).

Le Critère	λ_{moyenne}	Écart type	COV (%)	La médiane	La marge
10% de B	1,048	0,015	1,46	1,044	[1.04 ; 1.07]
Bulter et Hoy	0,950	0,032	3,34	0,945	[0.91 ; 0.98]
Hyperbolique	1,231	0,183	14,88	1,158	[1.08 ; 1.53]
Davisson	0,949	0,062	6,50	0,956	[0.84 ; 1.04]
De Beer	0,937	0,134	14,35	0,962	[0.71 ; 1.06]
Décourt	1,044	0,127	12,20	1,037	[0.85 ; 1.26]
FDOT	0,879	0,166	18,84	0,930	[0.50 ; 1.02]
Fuller et Hoy	0,933	0,034	3,66	0,932	[0.88 ; 0.98]
Hansen	0,942	0,275	29,21	1,064	[0.29 ; 1.11]
PARECT	1,030	0,107	10,42	1,000	[0.92 ; 1.28]
Van der Veen	1,051	0,093	8,82	1,030	[0.93 ; 1.25]

Il est remarquable, d'après l'analyse statistique de λ illustrée au tableau 5.16, que :

Les valeurs de λ_{moyenne} sont comprises entre 0.879 et 1.231, Le coefficient de variation COV paraît un pourcentage variant entre 1.46 % et 29.21 %, ce qu'explique une dispersion variable d'un critère à l'autre, le critère de 10% de B donne la plus faible dispersion 1.46 %, et le critère de Hansen donne la plus grande dispersion 29.21 %. Les critères Hansen présentent la plus grande marge et donc la plus grande d'écart type (SD).

On peut voir que les valeurs μ moyennes pour les critères Van der veen et PARECT sont les plus proches de 1, 1.016 et 1.030 (exactitude idéale), respectivement. Les valeurs de coefficient de variation pour les critères de 10 % de B et bulter et Hoy sont les plus proches de zéro à 1.46 et 3.34, respectivement (bonne exactitude).

5.7.4. Classement général des critères de capacité portante :

Le classement est établi selon les paramètres statistiques étudiés précédente.

5.7.4.1. Classement des critères selon la fréquence d'application :

Le tableau 5.17 ci-dessous présente le classement des critères de capacité portante selon la fréquence d'application en %.

Tableau 5.17 : Classement des critères selon la fréquence d'application (argile).

Les Critères	La fréquence D'application en %	Le classement
PARECT	100	1 ^{ère}
Bulter et Hoy	100	1 ^{ère}
Davisson	100	1 ^{ère}
FDOT	100	1 ^{ère}
De Beer	100	1 ^{ère}
Décourt	100	1 ^{ère}
Hyperbolique	100	1 ^{ère}
10% de B	87.5	2 ^{ème}
Hansen	87.5	2 ^{ème}
Fuller et Hoy	75.0	3 ^{ème}
Van der Veen	50.0	4 ^{ème}

Les critères de **PARECT**, **Hyperbolique** et **Décourt**, **Bulter et Hoy**, **Davisson**, **F. Dot** et **De beer** présentes les plus grands pourcentages de fréquence 100 %, alors est les premiers aux classements selon la fréquence d'application.

5.7.4.2. Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude) :

Le tableau 5.18 regroupe le classement des critères de capacité portante selon la moyenne.

Tableau 5.18 : Classement des critères selon la moyenne μ (argile).

Les Critères	La moyenne μ	Le classement
PARECT	1.030	1 ^{ère}
Décourt	1.044	2 ^{ème}
10% de B	1.048	3 ^{ème}
Bulter et Hoy	0.950	4 ^{ème}
Van der Veen	1.051	5 ^{ème}
Davisson	0.949	6 ^{ème}
Hansen	0.942	7 ^{ème}
De Beer	0.937	8 ^{ème}
Fuller et Hoy	0.933	9 ^{ème}
FDOT	0.879	10 ^{ème}
Hyperbolique	1.231	11 ^{ème}

Le critère **PARECT** présente la valeur la plus proche à 1 (exactitude idéale), de 1.030, est donc le premier au classement selon l'exactitude.

5.7.4.3. Classement des critères selon le coefficient de variation - COV - (précision) :

Le tableau 5.19 regroupe le classement des critères de capacité portante selon le COV.

Tableau 5.19 : Classement des critères selon le coefficient de variation (argile).

Les Critères	COV	Le classement
10% de B	1.46	1 ^{ère}
Bulter et Hoy	3.34	2 ^{ème}
Fuller et Hoy	3.66	3 ^{ème}
Davisson	6.50	4 ^{ème}
Van der Veen	8.82	5 ^{ème}
PARECT	10.42	6 ^{ème}
Décourt	12.20	7 ^{ème}
De Beer	14.35	8 ^{ème}
Hyperbolique	14.88	9 ^{ème}
FDOT	18.84	10 ^{ème}
Hansen	29.21	11 ^{ème}

Le critère **10 % de B** présente la valeur la proche de zéro (précision idéale), de 1.46, est donc le premier au classement selon la précision.

5.7.4.4. Classement des critères selon le niveau de prévision de la capacité portante (N_p) :

Le tableau 5.20 présente le classement des critères selon la probabilité.

Tableau 5.20 : Classement selon le niveau de prévision (argile).

Les Critères	Le niveau de prévision	Le classement
10% de B	100	1 ^{ère}
Bulter et Hoy	100	1 ^{ère}
Davisson	100	1 ^{ère}
Fuller et Hoy	100	1 ^{ère}
Décourt	88	2 ^{ème}
FDOT	88	2 ^{ème}
Hansen	88	2 ^{ème}
PARECT	88	2 ^{ème}
Van der Veen	88	2 ^{ème}
De Beer	83	3 ^{ème}
Hyperbolique	50	4 ^{ème}

Les critères de **Davisson**, **10 % de B**, **Bulter et Hoy** et **Fuller et Hoy** présentes les meilleures valeurs été égale à 100 %, est donc le premier au classement selon le niveau de prévision.

5.7.4.5. Classement général des critères de capacité portante :

Le tableau 5.21 présente le classement général des critères de capacité portante selon la sommation de tous les classements précédents.

Tableau 5.21 : Classement général des critères (argile).

Les Critères	Somme des classements	Le classement
10% de B	7	1 ^{ère}
Bulter et Hoy	8	2 ^{ème}
PARECT	10	3 ^{ème}
Davisson	12	4 ^{ème}
Décourt	12	4 ^{ème}
Fuller et Hoy	16	5 ^{ème}
Van der Veen	16	5 ^{ème}
De Beer	20	6 ^{ème}
Hansen	22	7 ^{ème}
FDOT	23	8 ^{ème}
Hyperbolique	25	9 ^{ème}

D'après le tableau 5.21, le classement général des critères montre que le critère de **10 % de B** est le premier. Il est le meilleur critère de capacité portante dans le sol argile.

5.8. Analyse statistique et classement des critères dans sol multicouche:

5.8.1. La fréquence d'application des critères :

Le tableau 5.22 ci-dessous présente les résultats de la fréquence en %, à partir des différents critères.

Tableau 5.22 : Résultats de la fréquence d'application des critères (multicouche).

Critères	10 % B	Bulter et Hoy	Hyper	Davisson	De beer	Décourt	F. Dot	Fuller et Hoy	Hansen	PARECT	Van der vin
La fréquence (%)	53.33	76.67	100	80	93.33	100	80	76.67	86.67	100	100

Comme le montre le tableau le critère Hyperbolique, Décourt, Van der Veen et PARECT représentent les plus grands pourcentages de fréquence 100 %. Le critère 10 % B représente le petit pourcentage de fréquence 50 %.

5.8.2. Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante :

Le tableau 5.23 ci-dessous contient les pourcentages des valeurs de λ supérieure à 1 (sur-estimation) et inférieure à 1 (sous-estimation) pour chaque critère étudié.

Tableau 5.23 : Répartition des valeurs de λ (multicouche).

Le Critère	Le % des valeurs de λ Supérieures à 1	Le % des valeurs de λ Inférieures à 1
10% de B	36.67	63.33
Bulter et Hoy	10	90
Hyperbolique	96.67	3.33
Davisson	3,33	96.67
De Beer	26.67	73.33
Décourt	80	20
FDOT	0	100
Fuller et Hoy	3.33	96.67
Hansen	73.33	26.67
PARECT	43.33	56.67
Van der Veen	76.67	23.33

Les critères de F. Dot présentent les plus grands pourcentages des valeurs sous-estimé ($\lambda < 1$) 100 %, donc sont les plus sécuritaires.

- Le critère Hyperbolique présente le grand pourcentage des valeurs sur-estimé ($\lambda > 1$) 96.67 % des valeurs du rapport $Ql(\text{critère}) / Ql \text{ moyenne}$ supérieures à 1 ce qui laisse à conclure que presque toutes les capacités portantes déterminées sont surestimées par rapport à la valeur moyenne.
- Les critères qu'ils présentes un pourcentage faible des valeurs inférieure ($\lambda < 1$) Hyperbolique, et supérieur ($\lambda > 1$) Fuller et Hoy et Davisson 3.33 %.

5.8.3. Étude statistique du rapport de capacité portante :

Le tableau 5.24 ci-dessous présente les résultats de l'étude statistique de λ pour chaque critère.

Le tableau 5.24 : Les résultats de l'étude statistique de λ (multicouche).

Le Critère	λ moyenne	Écart type	COV (%)	La médiane	La marge
10% de B	1,022	0,075	7,30	1,040	[0.87 ; 1.14]
Bulter et Hoy	0,935	0,071	7,54	0,942	[0.75 ; 1.09]
Hyperbolique	1,230	0,204	16,57	1,227	[0.89 ; 1.92]
Davisson	0,876	0,114	12,97	0,906	[0.57 ; 1.01]
De Beer	0,820	0,300	36,61	0,877	[0.10 ; 1.36]
Décourt	1,215	0,273	22,49	1,174	[0.68 ; 1.90]
FDOT	0,830	0,139	16,79	0,839	[0.54 ; 0.99]
Fuller et Hoy	0,911	0,069	7,58	0,907	[0.73 ; 1.07]
Hansen	1,102	0,131	11,86	1,095	[0.83 ; 1.47]
PARECT	0,953	0,129	13,50	0,991	[0.50 ; 1.08]
Van der Veen	1,024	0,063	6,14	1,029	[0.86 ; 1.18]

Il est remarquable, d'après l'analyse statistique de λ illustrée au tableau 5.24, que :

Les valeurs de λ moyenne sont comprises entre 0.820 et 1.230, Le coefficient de variation COV paraît un pourcentage variant entre 6.14 % et 36.61 %, ce qu'explique une dispersion variable d'un critère à l'autre, le critère de van der veen donne la plus faible dispersion 6.14 %, et le critère de De beer donne la plus grand dispersion 36.61 %. Le critère De beer présente la plus grande marge et donc la plus grand d'écart type (SD).

Le tableau 5.25 ci-dessous présente les résultats des paramètres statistiques résultant de l'ajustement de l'histogramme de λ pour un critère donné par la probabilité de gauss. L'ajustement est fait par logiciel Origin Pro 9.0.

Tableau 5.25 : Résultats des paramètres statistiques (multicouche).

Le Critère	La moyenne μ	L'écart type σ	Fréquence Relative max	Coefficient de Régression R (%)
10% de B	1.034	0.026	39.18	94.47
Bulter et Hoy	0.937	0.039	40.39	98.62
Hyperbolique	1.300	0.204	50.00	81.31
Davisson	0.951	0.114	46.11	/
De Beer	0.917	0.148	39.76	95.79
Décourt	1.157	0.189	34.63	98.69
FDOT	0.950	0.139	34.78	/
Fuller et Hoy	0.922	0.051	34.18	90.92
Hansen	1.101	0.066	47.28	95.39
PARECT	1.014	0.087	47.05	99.60
Van der Veen	1.036	0.035	45.64	99.02

Le coefficient de régression R% étant dans les critères de PARECT, Van der veen, Décourt, Bulter et Hoy, De beer, Hansen, 10 % de B, Fuller et Hoy ont un pourcentage supérieur à 99.60 %, 99.02 %, 98.69 %, 98.62 %, 95.79 %, 95.39 %, 94.47 % et 90.92 % respectivement, ce qui signifie une bonne qualité d'ajustement.

On peut voir que les valeurs μ moyennes pour les critères PARECT et 10 % de B sont les plus proche de 1, 0.953 et 1.022 (exactitude idéale), respectivement. Les valeurs d'écart types pour les critères de Fuller et Hoy et Van der veen sont les plus proches de zéro à 0.069 et 0.063, respectivement (bonne exactitude).

Les figures ci-dessous présentent les histogrammes des critères de capacité portante qui ajustés par la loi de gauss, appliqué par logiciel Origin Pro 9.0.

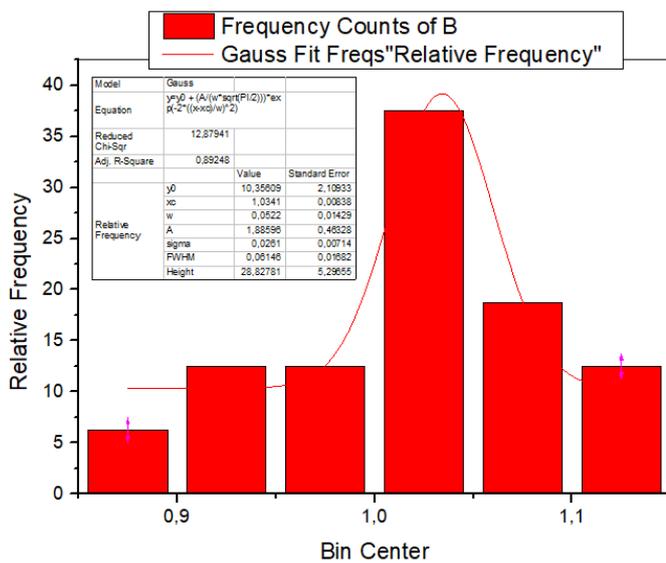


Figure 5.13 : Critère de 10% de B (Multicouche).

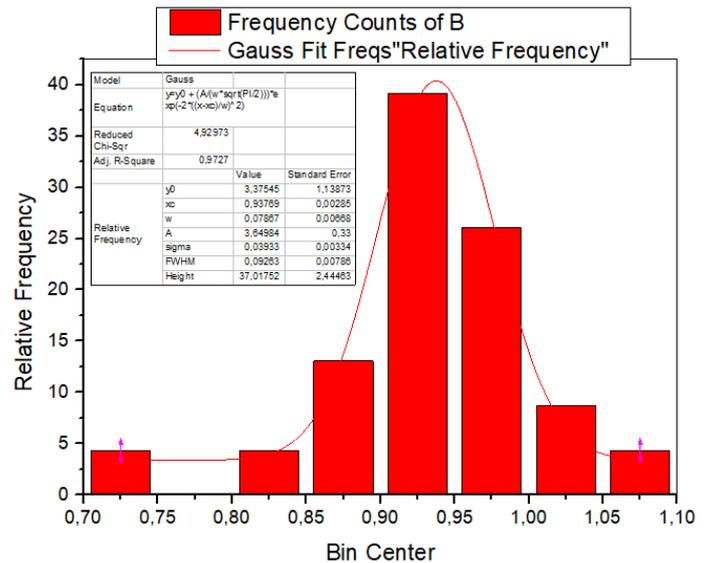


Figure 5.14 : Critère de Bulter et Hoy (Multicouche).

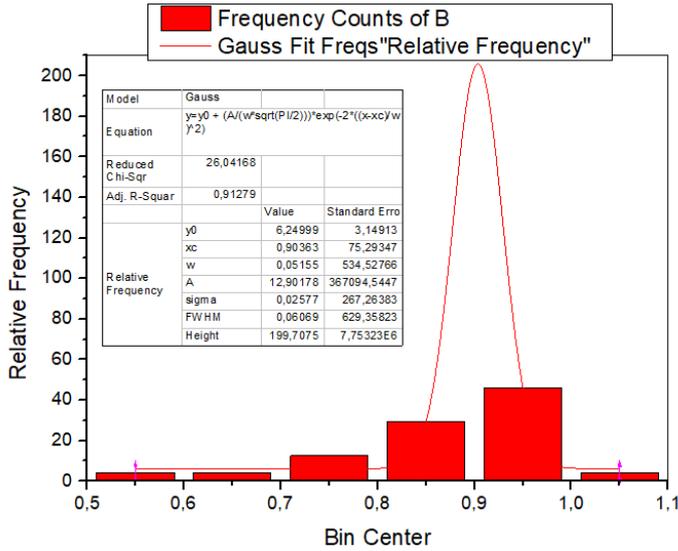


Figure 5.15 : Critère de Davisson (Multicouche).

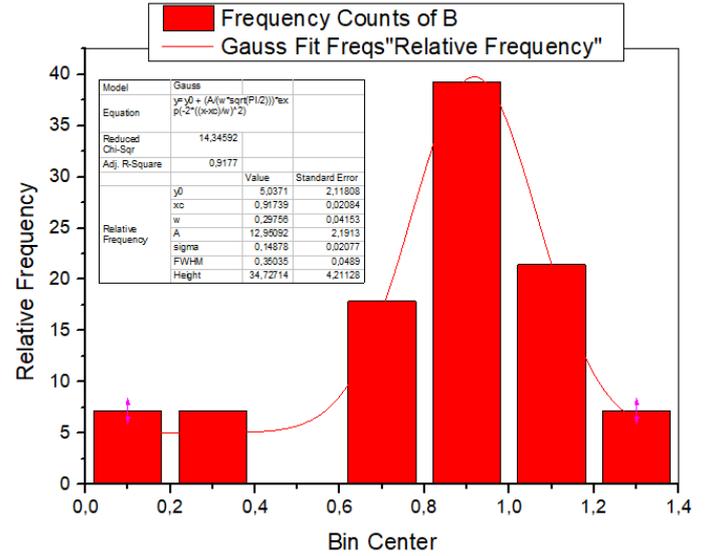


Figure 5.16 : Critère de De Beer (Multicouche).

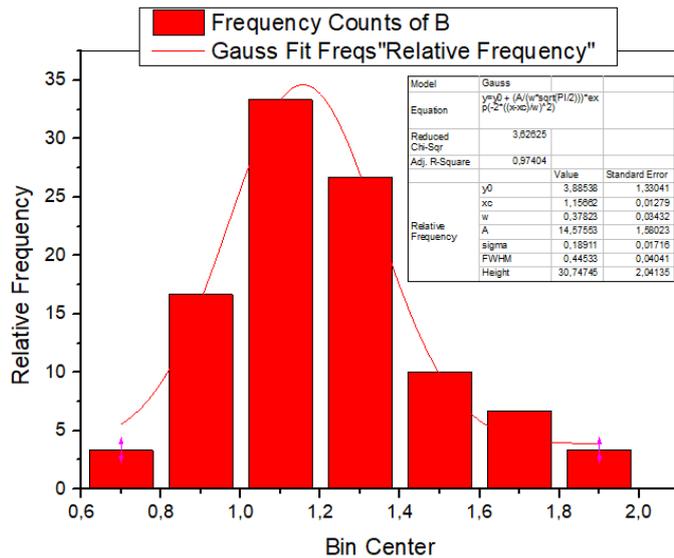


Figure 5.17 : Critère de Décourt (Multicouche).

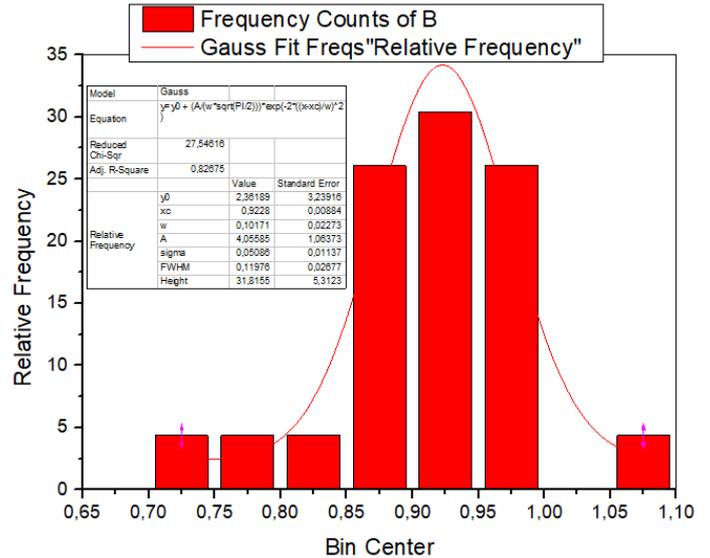


Figure 5.18 : Critère de Fuller et Hoy (Multicouche).

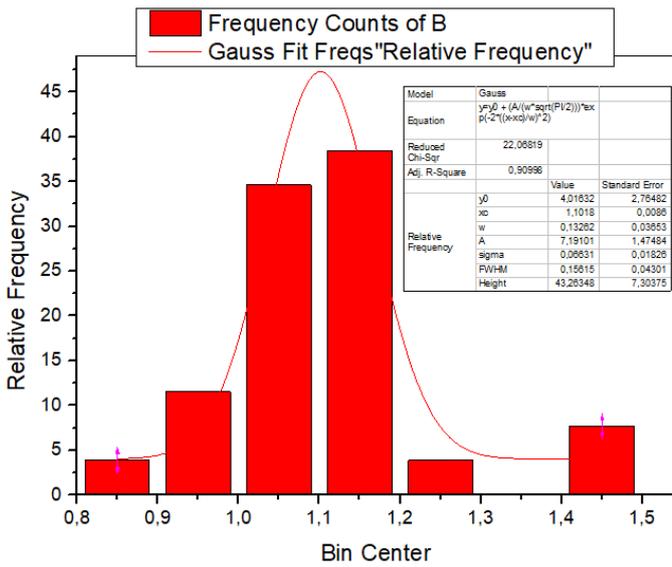


Figure 5.19 : Critère de Hansen (Multicouche).

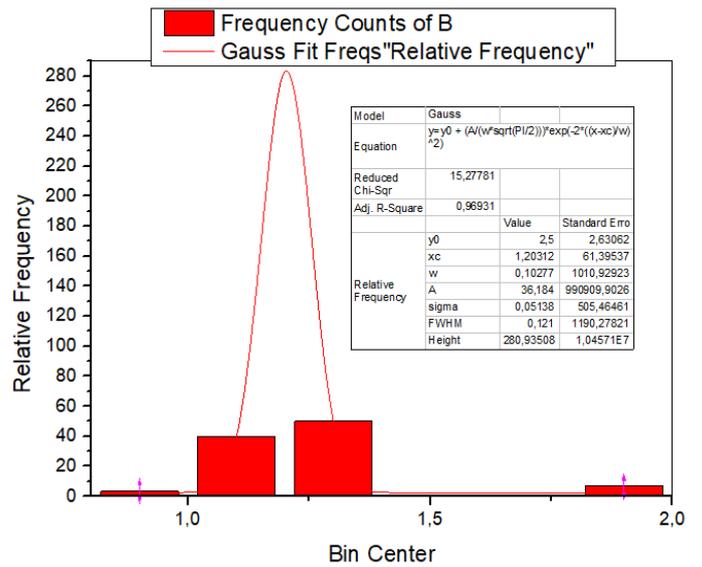


Figure 5.20 : Critère de Hyperbolique (Multicouche).

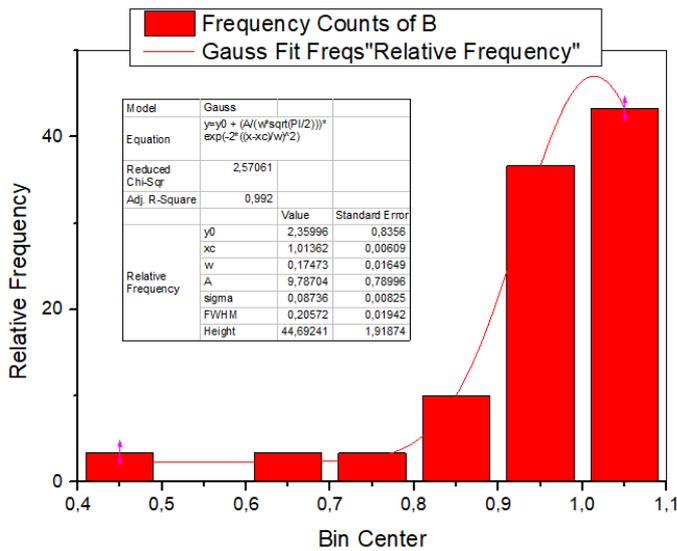


Figure 5.21 : Critère de PARECT (Multicouche).

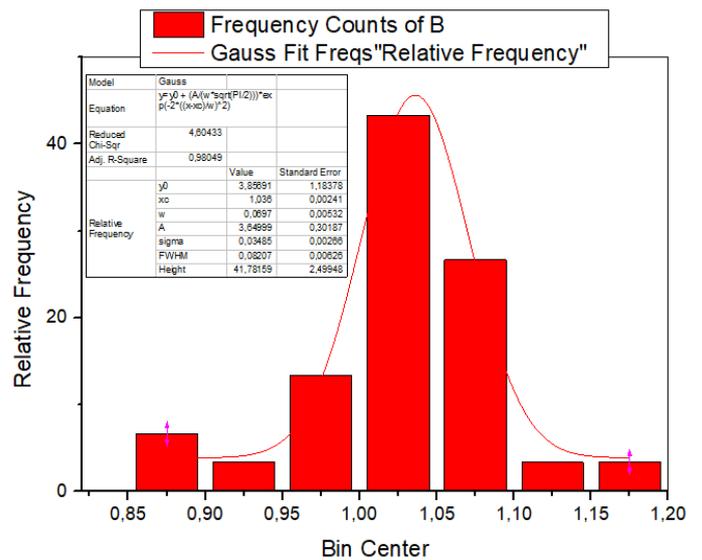


Figure 5.22 : Critère de Van der veen (Multicouche).

5.8.4. Classement général des critères de capacité portante :

Le classement est établi selon les paramètres statistiques étudiés précédente.

5.8.4.1. Classement des critères selon la fréquence d'application :

Le tableau 5.26 ci-dessous présente le classement des critères de capacité portante selon la fréquence d'application en %.

Tableau 5.26 : Classement des critères selon la fréquence d'application (multicouche).

Les Critères	La fréquence D'application en %	Le classement
Hyperbolique	100	1 ^{ère}
Décourt	100	1 ^{ère}
PARECT	100	1 ^{ère}
Van der Veen	100	1 ^{ère}
De Beer	93.33	2 ^{ème}
Hansen	86.66	3 ^{ème}
Davisson	80	4 ^{ème}
FDOT	80	4 ^{ème}
Bulter et Hoy	76.66	5 ^{ème}
Fuller et Hoy	76.66	5 ^{ème}
10% de B	53.33	6 ^{ème}

Les critères de **Van der Veen**, **PARECT**, **Hyperbolique** et **Décourt** présentes les plus grands pourcentages de fréquence 100 %, alors est les premiers aux classements selon la fréquence d'application.

5.8.4.2. Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude) :

Le tableau 5.27 regroupe le classement des critères de capacité portante selon la moyenne.

Tableau 5.27 : Classement des critères selon la moyenne μ (multicouche).

Les Critères	La moyenne μ	Le classement
PARECT	1,014	1 ^{ère}
10% de B	1,034	2 ^{ème}
Van der Veen	1,036	3 ^{ème}
Davisson	0,951	4 ^{ème}
FDOT	0,950	5 ^{ème}
Bulter et Hoy	0,937	6 ^{ème}
Fuller et Hoy	0,922	7 ^{ème}
De Beer	0,917	8 ^{ème}
Hansen	1,101	9 ^{ème}
Décourt	1,157	10 ^{ème}
Hyperbolique	1,3	11 ^{ème}

Le critère **PARECT** présente la valeur la plus proche à 1 (exactitude idéale), de 1.014, est donc le premier au classement selon l'exactitude.

5.8.4.3. Classement des critères selon l'écart type σ (précision) :

Le tableau 5.28 regroupe le classement des critères de capacité portante selon l'écart type.

Tableau 5.28 : Classement des critères selon l'écart type (multicouche).

Les Critères	L'écart type	Le classement
10% de B	0.026	1 ^{ère}
Van der Veen	0.035	2 ^{ème}
Bulter et Hoy	0.039	3 ^{ème}
Fuller et Hoy	0.051	4 ^{ème}
Hansen	0.066	5 ^{ème}
PARECT	0.087	6 ^{ème}
Davisson	0.114	7 ^{ème}
FDOT	0.139	8 ^{ème}
De Beer	0.148	9 ^{ème}
Décourt	0.189	10 ^{ème}
Hyperbolique	0.204	11 ^{ème}

Le critère **10 % de B** présente la valeur la proche de zéro (précision idéale), de 0.026, est donc le premier au classement selon la précision.

5.8.4.4. Classement des critères selon le niveau de prévision de la capacité portante (N_p) :

Le tableau 5.29 présente le classement des critères selon le niveau de prévision.

Tableau 5.29 : Classement selon le niveau de prévision (multicouche).

Les Critères	Le niveau de prévision	Le classement
10% de B	100	1 ^{ère}
Van der Veen	100	1 ^{ère}
Bulter et Hoy	96	2 ^{ème}
Fuller et Hoy	91	3 ^{ème}
PARECT	90	4 ^{ème}
Hansen	88	5 ^{ème}
Davisson	79	6 ^{ème}
FDOT	63	7 ^{ème}
De Beer	61	8 ^{ème}
Décourt	50	9 ^{ème}
Hyperbolique	43	10 ^{ème}

Le critère **Van der veen** présente la meilleure valeur été égale à 100 %, est donc le premier au classement selon le niveau de prévision.

5.8.4.5. Classement général des critères de capacité portante :

Le tableau 5.30 présente le classement général des critères de capacité portante selon la sommation de tous les classements précédents.

Tableau 5.30 : Classement général des critères (multicouche).

Les Critères	Somme des classements	Le classement
Van der Veen	7	1 ^{ère}
10% de B	10	2 ^{ème}
PARECT	12	3 ^{ème}
Bulter et Hoy	16	4 ^{ème}
Fuller et Hoy	19	5 ^{ème}
Davisson	21	6 ^{ème}
Hansen	22	7 ^{ème}
FDOT	24	8 ^{ème}
De Beer	27	8 ^{ème}
Décourt	30	9 ^{ème}
Hyperbolique	33	10 ^{ème}

D'après le tableau 5.30, le classement général des critères montre que le critère de **Van der veen** est le premier. Il est le meilleur critère de capacité portante dans le sol multicouche.

5.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons expliqué et étudié les différents critères utilisés dans notre étude à savoir (11 critères) , **Hyperbolique**, critère **Décourt**, **De beer** (b-logarithmique), critère de **Van der Ven** (exponentiel) , le critère **10%B** , le critère **PARECT** (parabole-rectangle), **Fdot** , critère de **Hansen** , critère de **Bulter et Hoy** , critère de **Fuller et Hoy** ,critère de **Davisson**. à partir ces critères nous avons interpréter les courbes de chargement obtenues d'un essai sur pieu. D'après l'interprétation et l'analyse statistique des courbes de chargement, il a été constaté que la détermination de la capacité portante aboutit à une grande différence de valeur, ce qui nécessite d'ordonner ces critères pour recommander le critère donnant la valeur la plus exacte, la plus précise, tout en respectant la sécurité (sous-estimation de la capacité portante). Ce classement se fait par rapport à la valeur moyenne de QL.

Après avoir effectué l'analyse statistique et classé les critères établis selon la nature de sol (sable, argile et multicouche), on constate d'après le classement général des critères de capacité portante que :

- ⇒ Le critère de **Van der veen** est le meilleur critère dans le sol multicouche.
- ⇒ Les critères de **10 % de B** et **PARECT** est les meilleurs critères dans le sable
- ⇒ Le critère de **10 % de B** est le meilleur critère dans l'argile.

Donc le critère **10 % de B** c'est le meilleur critère de capacité portante des pieux.

Chapitre

06

*Étude des critères de
résistance latérale des pieux*

6.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons analysé et interprété les résultats des essais de chargement latéral selon la nature du sol qui contient 33 essais dans le sable, 38 essais dans l'argile, 50 essais dans le sol multicouche et 2 essais seulement dans le limon. en utilisant les six critères que nous avons présentés précédemment (la partie axial), qui sont les suivants :

- Critère PARECT.
- Critère Hyperbolique.
- Critère Décourt.
- Critère De beer.
- Critère 10% de B.
- Critère Van der veen.

Cette interprétation comprend la détermination de la charge latérale limite (H_u), la raideur latérale initiale (K_h0), le déplacement de référence (Y_0R).

Après , Nous avons effectué l'analyse statistique des résultats de différents critères de résistance latérale tous jours selon la nature de sol (sable, argile, multicouche, limon).

Cela se fait à travers plusieurs étapes comme nous l'avons déjà vu, Au début nous allons déterminer la fréquence d'application des critères. Ensuite nous allons présenter une étude statistique d'un paramètre appelé rapport de résistance latérale, en déterminant sa moyenne, son écart type, le coefficient de variation, sa médiane, et sa marge. En ajustant l'histogramme du rapport de résistance latérale par la fonction de probabilité de gauss, on en déduira les valeurs de l'écart type σ , la moyenne μ , le coefficient de régression R , et la fréquence relative max de l'histogramme.

Ces paramètres nous permettent de faire un classement général des critères de résistance latérale, et recommander une ou plusieurs critères en fonction de la nature du sol.

6.2. Interprétation des courbes de chargement dans le sable :

6.2.1. Exemple d'Interprétation des courbes de chargement dans un sol sableux :

L'interprétation des courbes de chargement-déplacement par les différents critères précédents permet l'évaluation globale de la résistance latérale limite à partir d'un essai de chargement. Les courbes de chargement sont tracées utilisant le logiciel d'analyse et de présentation graphique des données Origin Pro version 9.0, ainsi que le programme Curve Expert Professional 2.6 (pour la méthode de Van der Veen).

Les figures ci-dessous représentent un exemple de la courbe de charge-déplacement de l'essai de chargement mené sur un pieu installé par battage, avec six critères.

Les caractéristiques géométriques pour cet exemple sont comme suivies :

- B (diamètre) = 406 mm.
- D (fiche) = 12.192 m.
- D/B = 60.03

Référence :

- Pays : Etats-Unis.
- Localisation : Port huenene, California.
- Nom de pieu : 81-41

Tableau 6.1 : L'essai de chargement statique vertical (sable).

1er cycle						
Charge (kN)	8.9	17.8	26.7	35.6	44.5	53.4
Tassement (mm)	0.51	1.27	2.54	4.32	7.11	10.67
2eme cycle						
Charge (kN)	62.3	71.2	80.1	82.77		
Tassement (mm)	15.75	20.83	30.48	33.02		

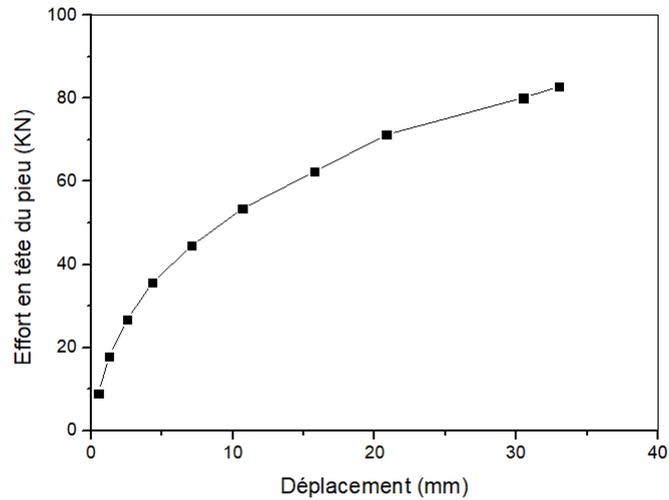


Figure 6.1 : Courbe charge-tassement (Sable).

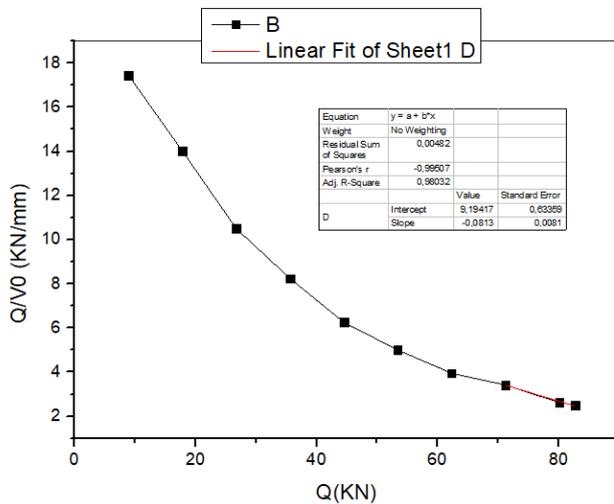


Figure 6.2 : Critère de Décourt (sable).

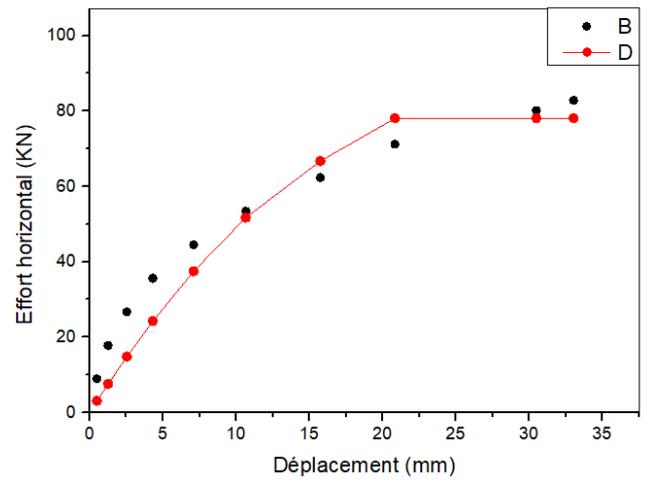


Figure 6.3 : Critère de PARECT (sable).

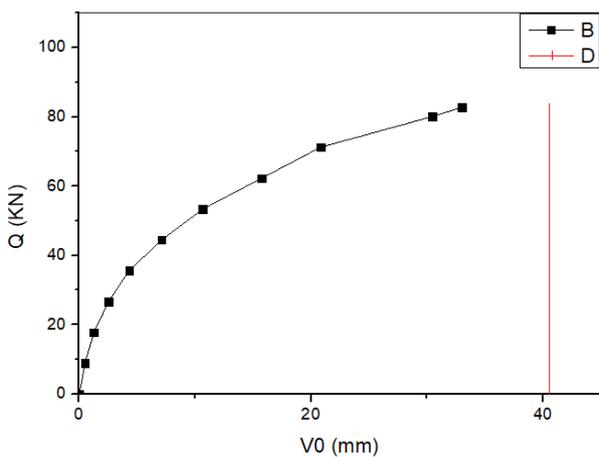


Figure 6.4 : Critère de 10 % B (sable).

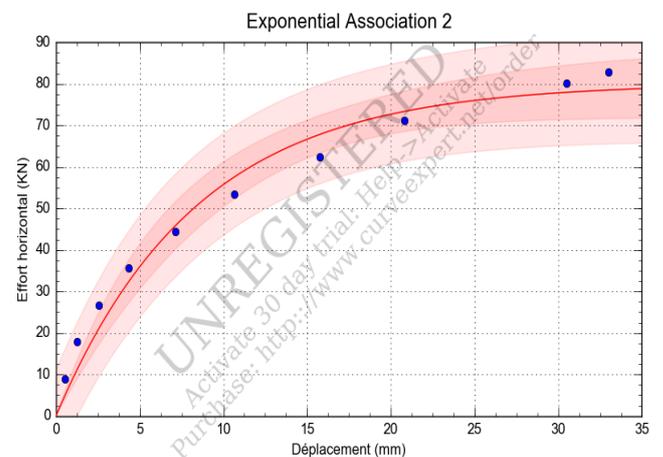
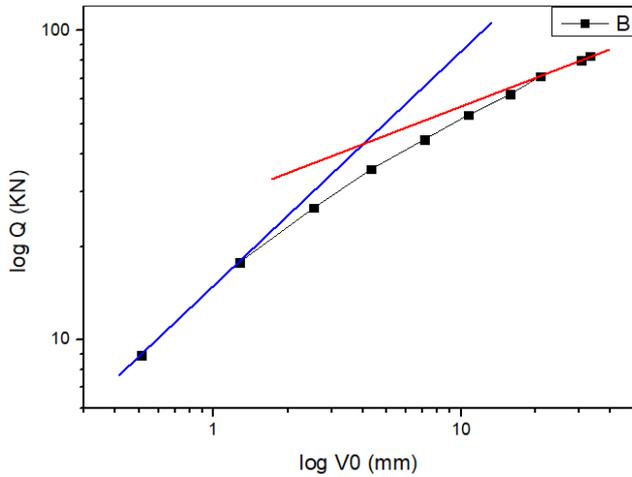


Figure 6.5 : Critère de Van der Veen (sable)



```

Y=a + b.X          enter 1
Y=X/(a+b.X)       enter 2
Y=a + b.LOG(X)    enter 3
Y=a.X^b           enter 4
2
Number N of points =?
10
Data to be input from file ? (0=1/N=0)
1
Name of Data file ?
p-81.txt
initial slope alpha of the curve      13.789800
Horizontal asymptote =                96.981570
Regression coeff. R=                  9.937593E-01
Do you want to compare this function with
a set of data ? (Y=1, N=0)

```

Figure 6.6 : Critère de beer (sable). **Figure 6.7 :** Critère d'hyperbolique (sable).

- Le critère de 10 % B non applicable car la droite ne passe pas sur la courbe de chargement.

Le tableau ci-dessous regroupe tous les résultats de la résistance latérale en kN, menés sur la base de données des essais de chargement statique, en appliquant tous les critères.

Tableau 6.2 : Résultats de résistance latérale d'un seul pieu en kN (sable).

Pieu : 81-41

<i>Critères</i>	Résistance latérale (KN)
<i>10% de B</i>	NA
<i>Hyperbolique</i>	96.981
<i>De Beer</i>	42.936
<i>Décourt</i>	113.089
<i>PARECT</i>	78.023
<i>Van der Veen</i>	80.054

Le critère de decourt présente la plus grande valeur de capacité portante 113.089 kN, ensuite le critère hyperbolique de 96.98 kN, alors que le critère De beer présente la plus petite valeur de capacité portant 42.93 kN.

6.2.2. Critère PARECT (parabole-rectangle) :

6.2.2.1. Charge latérale limite (H_u) :

Par définition, la charge latérale limite (résistance latérale) présente la plus grande charge à laquelle le sol peut résister. Dans le cas des courbes de chargement latéral statique, cette charge latérale limite est obtenue empiriquement à partir des critères de résistance latérale vue au paragraphe précédent.

Afin d'obtenir la charge latérale ultime, la courbe de charge latéral est ajustée par le programme de calcul "PARECT" qui est basé sur la méthode d'ajustement aux moindres carrés, La qualité de l'ajustement est vérifiée par le Coefficient de régression R.

Si R est proche de 1, cela veut dire que nous avons une bonne qualité d'ajustement.

NB : Chaque essai est défini par un code qui contient (le numéro d'enregistrement et le numéro de référence).

Les résultats de résistance latérale des pieux sont représentés aux tableaux 6.3 présentés ci-dessous.

Tableau 6.3 : Charge latérale limite dans le sable.

N. Cas	10 % de B	Hyperbolique	De beer	Décourt	Van der veen	PARECT	
						H_u (KN)	R (%)
01-146	34.3	57.86	NA	67.204	48.71	34.785	98.18
02-146	1.067	6.031	NA	NA	NA	NA	NA
14-280	17.651	97.185	NA	137.653	74.196	50	99.39
15-517	NA	158.641	NA	239.356	140.065	138.426	89.94
18-517	NA	123.412	59.26	127.941	104.513	100	94.5
44-638	NA	878.545	340.555	2499.36	960.6	600	96.44
81-41	NA	96.981	42.936	113.089	80.054	78.023	93.89
82-41	0.983	2.476	0.864	4.599	2.422	2.038	97.75
83-41	NA	542.892	178	670.358	424	378.25	97.19
84-41	111.73	163.7	88.488	259.307	133.696	123.26	95.96
85-41	193.173	601.478	166.35	573.719	391.697	289.25	99.84

99-283	165.49	292.86	34.23	NA	270.05	176.29	98.76
100-283	159	344.32	53.56	605.16	293.19	176.29	99.46
101-283	13.01	80.39	10.64	33.43	26.93	17.8	95.42
102-283	55.95	110.29	33.53	115.27	75.26	68.06	98.17
103-283	NA	1000.62	NA	143.77	180.02	NA	NA
104-283	NA	440.05	NA	236.84	193.33	87.95	98.96
105-283	0.99	3.25	1	4.37	2.61	2.11	98.87
106-283	NA	674.68	133.5	745.15	441.01	222.5	99.92
107-283	NA	304.45	NA	392.41	230.56	174.82	98.53
108-283	NA	229.82	67.43	315.42	176.82	155.77	97.86
109-283	NA	315.89	44.5	489.29	220.87	155.75	99.59
110-283	NA	212.23	80.99	264.4	152.77	111.25	99.45
111-283	NA	217.92	99.2	270.95	166.29	155.75	96.99
114-1315	NA	338.28	NA	NA	331.31	178	98.87
115-1315	NA	435.101	NA	526.61	285.871	222.5	99.27
116-1315	NA	411.92	NA	682.29	318.63	222.5	99.45
117-1315	NA	396.42	133.5	296.72	236.43	178	99.72
130-41	NA	721.6	121.24	5593.66	806.01	251.72	98.99
131-41	NA	416.15	105.54	516.16	298.04	222.5	99.25
161-146	14.77	39.71	26.15	40.48	32.52	30.23	96.83
162-74	NA	314.44	NA	348.4	227.77	199.65	98.42
168-283	NA	118.52	NA	159.07	87.94	66.75	99.26

6.2.2.2. Raideur latérale initiale (K_{H0}) :

La raideur est la caractéristique qui indique la résistance à la déformation élastique d'un corps (par exemple un ressort) ou d'une autre manière. La raideur K_{H0} d'un matériau élastique qui et la raideur du ressort représentent ce matériau. est la propriété de ce matériau à limiter les déplacements sous une charge statique. Ces termes « raideur » et « rigidité » sont équivalents.

La connaissance de cette raideur est très utile pour l'ingénieur. car elle permet d'évaluer directement le déplacement latéral y_0 du pieu (qui est donc celui de la fondation sur pieux) sous une charge latérale de service H :

$$y_{0c} = Hu/K_0^H \quad (6.1)$$

Le programme de calcul « PARECT » donne la valeur de la raideur latérale initiale. L'ensemble des valeurs est représenté sous forme de tableaux (voir les tableaux 6.4 ci-dessous.)

Tableau 6.4 : Raideur latérale initiale dans le sable.

essais	KH0	essais	KH0
01-146	4.112	104-283	12.67
02-146	NA	105-283	2.14
14-280	0.674	106-283	26.07
15-517	23.47	107-283	19.07
18-517	17.049	108-283	23.71
22-414	NA	109-283	19.75
44-638	75.804	110-283	19.28
81-41	6.128	111-283	18.53
82-41	0.208	114-1315	26.39
83-41	25.643	115-1315	20.445
84-41	4.925	116-1315	12.17
85-41	7.02	117-1315	10.96
99-283	6.23	130-41	24.6
100-283	6.11	131-41	27.97

101-283	1.42		161-146	1.49
102-283	3.79		162-74	14.75
103-283	NA		168-283	10.23

6.2.2.3. Déplacement de référence (y_{0R}) :

Le déplacement de référence est le déplacement qui correspond à la charge latérale limite (voir figure 6.8). Dans le domaine des petits déplacements $[0, y_{0R}]$, et comme le montre la figure C.2, il existe une proportionnalité entre la charge horizontale et le déplacement en tête du pieu y_0 . On a donc :

$$H = KH y_0 \quad (6.2)$$

En schématisant la courbe de chargement $H=f(y_0)$ par une courbe élasto-plastique, le déplacement de référence correspond à la charge latérale limite et on peut ainsi écrire la relation suivante :

$$y_{0R} = H_u / KH$$

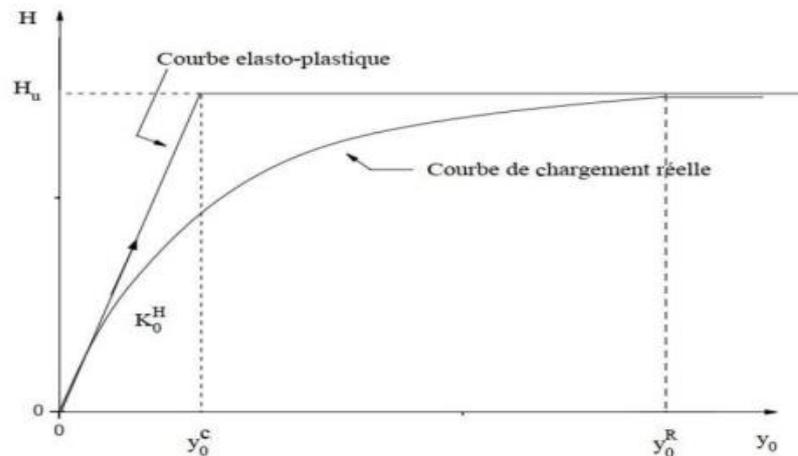


Figure 6.8 : Courbe normalisée de chargement horizontal d'un pieu.

Tableau 6.5 : Déplacement de référence dans le sable.

essais	y0 R (mm)	y0 R /B%	essais	y0 R (mm)	y0 R /B%
01-146	8.459	11.131	104-283	6.942	3.420
02-146	-	-	105-283	0.986	3.867
14-280	74.184	54.347	106-283	8.535	4.204
15-517	5.898	3.932	107-283	9.167	4.516
18-517	5.865	3.910	108-283	6.570	3.205
22-414	-	-	109-283	7.886	3.847
44-638	7.915	1.299	110-283	5.770	3.206
81-41	12.732	6.272	111-283	8.405	4.722
82-41	9.798	38.424	114-1315	6.745	3.323
83-41	14.751	5.807	115-1315	10.883	5.361
84-41	25.027	14.301	116-1315	18.283	8.790
85-41	41.204	22.891	117-1315	16.241	8.000
99-283	28.297	15.897	130-41	10.233	3.936
100-283	28.853	16.209	131-41	7.955	3.880
101-283	12.535	20.719	161-146	20.289	39.782
102-283	17.958	16.400	162-74	13.536	5.414
103-283	-	-	168-283	6.525	3.666

6.3. Interprétation des courbes de chargement dans l'argile :

Tableau 6.6 : Charge latérale limite dans l'argile.

N. Cas	10 % de B	Hyperbolique	De beer	Décourt	Van der veen	PARECT	
	Hu (KN)					Hu (KN)	R (%)
08-578	NA	182,705	NA	NA	129,22	90	97,38
10-562	87,875	222,372	65,4	237,022	130,39	NA	NA
17-428	86,87	145,575	NA	142,175	101,82	89	98,98
24-403	NA	114,753	NA	130,198	93,442	90,72	93
26-414	NA	146,58	NA	177,711	112,41	90,732	97,33
29-403	NA	734,635	181,44	684,583	474,576	362,88	99,04
34-851	4,068	13,552	NA	12,482	9,583	7,85	99,4
35-851	20,831	51,132	NA	79,366	39,447	31,2	98,82
36-851	42	65,238	909,78	65,932	48,68	43,95	97,54
37-851	72,5	129,409	NA	182,14	100,593	74,07	99,2
48-850	NA	135,035	70,102	156,256	105,82	100	96,55
62-673	42,076	70,06	NA	82,053	52,308	46,2	97,45
71-673	NA	955,01	324	967,369	691,061	618,2	97,89
86-283	NA	129,496	NA	187,891	95,164	78,01	94,93
89-283	8,024	24,585	9,12	23,967	16,976	NA	NA
90-283	35,964	90,989	NA	121,284	71,013	44,5	99,8
91-283	NA	122,36	36,4	134,72	84,44	66,75	98,34
92-283	NA	133,51	22,25	279,03	163,8	81,92	98,95
94-283	18,08	50,17	NA	NA	48,9	31,33	97,54
95-283	40,26	57,28	31,02	62,82	45,74	41,81	97,07
96-283	NA	132,55	NA	150,25	88,76	66,75	99,33
98-283	53,93	109,22	43,21	117,62	80,92	71,82	97,2
118-512	NA	123,33	79,32	123,14	106,02	110,71	89,46
119-512	NA	145,74	47,43	157,43	113,68	110	97,36
120-512	NA	634,5	382,59	703,17	520,49	500	95,92

121-516	NA	115,53	NA	139,93	100,24	94,5	96,31
122-516	NA	114,74	NA	114,84	98,11	96,6	95,51
123-516	NA	65,93	31,85	66,91	56,64	55	92,26
124-516	NA	64,19	39,52	63,13	56,16	55	94,64
125-516	NA	144,52	71,28	152,47	111,62	100	96,87
126-516	NA	178,77	NA	199,5	153,23	150	94,18
128-611	24,93	49,61	NA	NA	40,96	32,42	97,11
140-283	NA	11	3,06	NA	9,78	NA	NA
142-85	66,46	154,11	40	141,38	105,27	100	94,97
155-633	58,12	152,87	87,3	189,82	124,26	108,7	96,64
158-864	224,59	553,01	NA	608,34	358,93	293,53	98,69
159-864	849,72	1388,21	NA	1478,98	1003,16	850	98,32
160-864	NA	1462,04	707,39	1767,59	1147,2	1150	89,89

Tableau 6.7 : Raideur latérale initiale dans l'argile.

essais	KH0	essais	KH0
08-578	10.114	95-283	2.56
10-562	NA	96-283	3.01
17-428	5.677	98-283	2.86
24-403	7.234	118-512	21.21
26-414	5.109	119-512	24.31
29-403	34.615	120-512	196.16
34-851	0.42	121-516	18.11
35-851	1.237	122-516	22.55
36-851	2.551	123-516	10.35
37-851	2.829	124-516	17.04

48-850	6.049		125-516	47.14
62-673	4.289		126-516	47.31
71-673	49.247		128-611	2.29
86-283	11.57		140-283	NA
89-283	NA		142-85	2.48
90-283	2.351		155-633	2.54
91-283	10		158-864	2.19
92-283	17.96		159-864	7.98
94-283	1.1		160-864	42.52

Tableau 6.8 : Déplacement de référence dans l'argile.

essais	y0 R (mm)	y0 R /B%	essais	y0 R (mm)	y0 R /B%
08-578	8.899	4.139	95-283	16.332	10.208
10-562	-	-	96-283	22.176	10.924
17-428	15.677	11.485	98-283	25.112	19.773
24-403	12.541	8.223	118-512	5.220	2.008
26-414	17.759	11.205	119-512	4.525	1.740
29-403	10.483	3.437	120-512	2.549	0.408
34-851	18.690	32.790	121-516	5.218	2.007
35-851	25.222	23.034	122-516	4.284	1.648
36-851	17.229	10.635	123-516	5.314	2.044
37-851	26.182	12.898	124-516	3.228	1.241

48-850	16.532	8.144		125-516	2.121	0.816
62-673	10.772	12.824		126-516	3.171	1.219
71-673	12.553	4.116		128-611	14.157	18.628
86-283	6.742	3.121		140-283	-	-
89-283	-	-		142-85	40.323	24.890
90-283	18.928	17.286		155-633	42.795	31.352
91-283	6.675	4.120		158-864	134.032	17.871
92-283	4.561	2.247		159-864	106.516	10.652
94-283	28.482	26.011		160-864	27.046	3.494

6.4. Interprétation des courbes de chargement dans le sol multicouche :

Tableau 6.9 : Charge latérale limite dans le sol multicouche.

N. Cas	10 % de B	Hyperbolique	De beer	Décourt	Van der veen	PARECT	
	Hu (KN)					Hu (KN)	R (%)
03-192	35,64	125,06	NA	213,395	96,91	42,7	99,65
12-382	NA	2967,816	NA	NA	2621,59	800	99,95
13-365	189,31	347,038	173,79	397,826	264,42	238	98,46
16-359	NA	707,976	392,23	NA	738,994	650	94,5
19-399	NA	195,336	77,08	230,194	145,921	125	98,37
20-399	NA	315,762	NA	332,485	202,5	125	99,94
21-399	882,265	1524,317	400	1654,24	1096,85	1000	97,19
23-429	93,043	312,865	90,275	312,634	191,321	117,48	99,78
38-624	NA	2247,46	NA	3777,29	1788,81	1696	94,79
39-624	NA	1374,375	739,104	1304,16	1002,81	848	98,65

40-624	NA	1610,046	NA	2683,28	1307,438	1364,75	87,91
41-753	NA	116,125	NA	112,702	93,026	90	97,27
42-753	NA	150,39	67,542	145,181	108,236	100	98,21
43-638	282,594	754,865	NA	593,238	400,95	300	99,23
45-638	NA	209,048	NA	395,061	216	200	89,87
46-638	297,234	554,929	253,021	588,061	420,247	375	96,35
59-767	NA	305,175	137,284	308,757	231,642	215,8	95,6
60-767	NA	442,844	275,904	411,153	335,943	313,15	99,38
61-767	NA	345,903	NA	333,58	256,861	240	99,56
63-340	NA	41,379	10	102,144	38,986	20	98,91
64-340	15	82,201	15,348	75,714	43,864	25	99,73
65-340	17,984	59,8	12,386	43,238	28,306	18	98,73
66-340	24,2	95,26	15,113	59,754	39,556	25	98,86
67-879	NA	202,255	NA	274,763	160,788	149,9	93,66
68-876	NA	530,576	178	614,861	433,139	400,5	92,1
69-756	NA	389,309	346,125	378,611	360,952	356,66	95,8
70-756	NA	522,374	NA	954,099	428,826	426,66	91,2
78-631	NA	222,227	45,692	360,29	174,717	160	96,85
80-931	189,92	340,283	203,56	337,32	258,307	230,78	98,54
112-755	906,01	1369,71	400	1829,58	1161,01	1075	94,23
127-573	27,11	157,17	NA	250,95	105,75	60	99,21
129-41	NA	451,96	NA	1127,71	394,67	267	98,56
134-283	75,11	125,78	NA	171,74	92,99	83,43	96,07
135-755	150	215,46	84,48	279,73	170,77	150	97,6
136-755	NA	256,2	66,17	313,94	184,8	150	98,92
137-1261	319,26	383,69	296,98	394	327,27	321,68	96,39
138-512	NA	36,81	20	NA	26,07	NA	NA
139-512	NA	429,5	111,54	413,7	296,77	NA	NA
143-614	NA	38,51	9,17	55,5	30,18	24,58	98,22
148-851	6,43	30,04	9,76	44,07	19,37	11,43	99,78

149-851	30,04	168,73	18,89	89,9	78,42	35,2	98,6
150-851	NA	173,24	NA	229,22	184,02	95,38	96,46
151-851	NA	187,82	NA	198,77	141,3	83,07	99,62
152-756	NA	142,95	NA	155,5	116,16	110	93,06
153-756	NA	220,63	80	217,44	164,73	160	93,04
154-631	NA	99,77	25,15	138,54	80,61	75	95,11
157-2000	NA	87,01	21,58	NA	78,6	60	98,77
166-1317	NA	1873,42	711,88	NA	1425,82	2250	98,18
167-1317	NA	1324,98	574,85	1378,93	1052	1045,04	95,16
169-1	NA	661,45	275,75	711,33	505,37	475	95,24

Tableau 6.10 : Raideur latérale initiale dans le sol multicouche.

essais	KH0	essais	KH0
03-192	1.711	69-756	72.076
12-382	20.43	70-756	34.799
13-365	4.606	78-631	13.637
16-359	26.973	80-931	4.667
19-399	9.51	112-755	16.2
20-399	11.248	127-573	1
21-399	15.654	129-41	7.77
23-429	4.806	134-283	5.5
38-624	74.38	135-755	8.02
39-624	52.31	136-755	11.19
40-624	79.48	137-1261	10.66
41-753	10.603	138-512	NA
42-753	6.821	139-512	NA
43-638	7.383	143-614	3.79

45-638	7.589		148-851	6.72
46-638	6.99		149-851	1.86
59-767	26.967		150-851	6.87
60-767	36.645		151-851	4.68
61-767	26.542		152-756	71.04
63-340	3.978		153-756	348.57
64-340	1.923		154-631	18.06
65-340	2.95		157-2000	3.59
66-340	3.843		166-1317	107.61
67-879	20.623		167-1317	99.87
68-876	123.101		169-1	192.23

Tableau 6.11 : Déplacement de référence dans le sol multicouche.

essais	y0 R (mm)	y0 R /B%	essais	y0 R (mm)	y0 R /B%
03-192	24.956	17.826	69-756	4.948	0.779
12-382	39.158	3.916	70-756	12.261	2.787
13-365	51.672	17.195	78-631	11.733	2.551
16-359	24.098	4.820	80-931	49.449	16.456
19-399	13.144	8.114	112-755	66.358	14.504
20-399	11.113	6.860	127-573	60.000	42.254
21-399	63.881	13.978	129-41	34.363	11.285
23-429	24.444	17.908	134-283	15.169	13.248
38-624	22.802	3.040	135-755	18.703	11.545
39-624	16.211	3.602	136-755	13.405	8.275
40-624	17.171	2.862	137-1261	30.176	7.941
41-753	8.488	4.244	138-512	-	-
42-753	14.661	7.330	139-512	-	-

43-638	40.634	13.344	143-614	6.485	8.534
45-638	26.354	8.785	148-851	1.701	2.984
46-638	53.648	18.155	149-851	18.925	17.283
59-767	8.002	1.600	150-851	13.884	8.570
60-767	8.546	1.709	151-851	17.750	8.744
61-767	9.042	1.808	152-756	1.548	0.310
63-340	5.028	9.858	153-756	0.459	0.104
64-340	13.001	25.491	154-631	4.153	0.903
65-340	6.102	11.964	157-2000	16.713	9.550
66-340	6.505	12.756	166-1317	20.909	2.788
67-879	7.269	1.773	167-1317	10.464	1.395
68-876	3.253	0.854	169-1	2.471	0.494

6.5. Interprétation des courbes de chargement dans le limon:

Tableau 6.12 : Charge latérale limite dans le limon.

N. Cas	10 % de B	Hyperbolique	De beer	Décourt	Van der veen	PARECT	
	Hu (KN)					Hu (KN)	R (%)
28-403	6,8	25,516	NA	25,764	18,285	13,61	97,4
132-283	1,56	28,75	9,74	30,63	19,73	13,35	99,82

Tableau 6.13 : Raideur latérale initiale dans le limon.

essais	KH0
28-403	0.254
132-283	3.82

Tableau 6.14 : Déplacement de référence dans le limon.

essais	y0 R (mm)	B	y0 R /B
28-403	53.583	0.356	30.103
132-283	3.495	0.356	1.963

6.6. Analyse statistique et classement des critères dans le sable :

6.6.1. La fréquence d'application des critères :

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la Fréquence d'application d'un critère est définie par le nombre des cas où le critère est applicable rapporté au nombre total des cas en pourcentage %. Alors qu'une fréquence de 100 % correspond à un critère applicable à tous les cas étudiés, une fréquence nulle correspond à un critère non applicable.

Tableau 6.15 : Résultats de la fréquence d'application des critères (sable).

Critères	10 % de B	Hyperbolique	De beer	Décourt	PARECT	Van der veen
La fréquence (%)	84.55	100	90.24	97,56	98.38	99.19

Comme le montre le tableau le critère Hyperbolique, est représenté le plus grand pourcentage de fréquence 100 %, Le critère 10 % B représente le petit pourcentage de fréquence avec 84.55 %.

6.6.2. Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante :

Le tableau 6.16 ci-dessous contient les pourcentages des valeurs de λ supérieure à 1 (sur-estimation) est inférieure à 1 (sous-estimation) pour chaque critère étudié.

Tableau 6.16 : Répartition des valeurs de λ (sable).

Critères	Le % des valeurs de λ Supérieures à 1	Le % des valeurs de λ Inférieures à 1
10 % de B	8.33	91.67
Hyperbolique	93.94	6.06
De beer	0	100
Décourt	96.97	3.33
PARECT	25.81	74.19
Van der veen	84.37	15.63

Le critère De beer présente le plus grand pourcentage des valeurs sous-estimé ($\lambda < 1$) 100 %, Il est donc considéré comme la plus sûr des valeurs du rapport $QI(\text{critère}) / QI$ moyenne inférieure à 1.

Le critère Décourt présente le plus grand pourcentage des valeurs sous-estimé ($\lambda > 1$) 96.97%, Il est donc considéré comme la plus sûr des valeurs du rapport $QI(\text{critère}) / QI$ moyenne supérieures à 1.

6.6.3. Étude statistique du rapport de résistance latérale :

Le tableau 6.17 ci-dessous présente les résultats de l'étude statistique de λ pour chaque critère.

Le tableau 6.17 : Les résultats de l'étude statistique de λ (sable).

Critères	λ moyenne	Écart type	COV (%)	La médiane	La marge
10 % de B	0.621	0.236	37.9	0.554	[0.28 ; 1.06]
Hyperbolique	1.772	0.894	50.5	1.546	[0.58 ; 5.10]
De beer	0.453	0.187	41.3	0.428	[0.10 ; 0.85]
Décourt	1.941	0.647	33.3	1.924	[0.65 ; 4.48]
PARECT	0.877	0.221	25.2	0.883	[0.20 ; 1.26]
Van der veen	1.160	0.276	23.8	1.145	[0.65 ; 2.35]

Il est remarquable, d'après l'analyse statistique de λ illustrée au tableau 6.17, que : Les valeurs de λ moyenne sont comprises entre 0.453 et 1.941. Le coefficient de variation COV paraît un pourcentage variant entre 25.2 % et 41.3 %, ce qu'explique une dispersion variable d'un critère à l'autre, le critère de PARECT donne la plus faible dispersion 25.2%, et le critère de De beer donne la plus grand dispersion 41.3 %. Le critère Hyperbolique présente la plus grande marge et donc le plus grand d'écart type (SD).

Le tableau 6.18 ci-dessous présente les résultats des paramètres statistiques résultant de l'ajustement de l'histogramme de λ pour un critère donné par la probabilité de gauss. L'ajustement est fait par logiciel Origin Pro 9.0.

Tableau 6.18 : Résultats des paramètres statistiques (sable).

Critères	La moyenne μ	Écart type σ	Fréquence Relative max	Coefficient de Régression R (%)
10 % de B	0.450	0.236	33.650	-
Hyperbolique	1.552	0.433	79.353	99.83
De beer	0.453	0.187	28.740	-
Décourt	1.911	0.471	40.468	98.89
PARECT	0.900	0.147	44.844	98.6
Van der veen	1.123	0.124	57.288	99.5

Le coefficient de régression R% étant dans les critères Hyperbolique, Décourt , PARECT, Van der veen, ont un pourcentage supérieur à 99.83%, 98.89%, 98.6%, 99.5%, respectivement, ce qui signifie une bonne qualité d'ajustement.

On peut voir que les valeurs μ moyennes pour les critères PARECT et Van der veen sont les plus proche de 1, 0.9 et 1.123 (exactitude idéale), respectivement et aussi les plus proches de zéro par rapport l'écart type à 0.147 et 0.124, respectivement (bonne exactitude). Les figures ci-dessous présentent les histogrammes des critères de résistance latérale qui ajustés par la loi de gauss, appliqué par logiciel Origin Pro 9.0 (cas de sable).

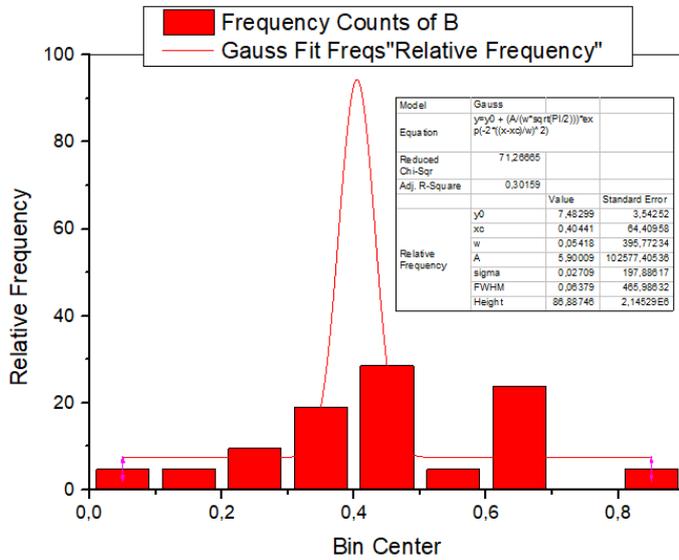


Figure 6.9 : Critère de De beer (sable).

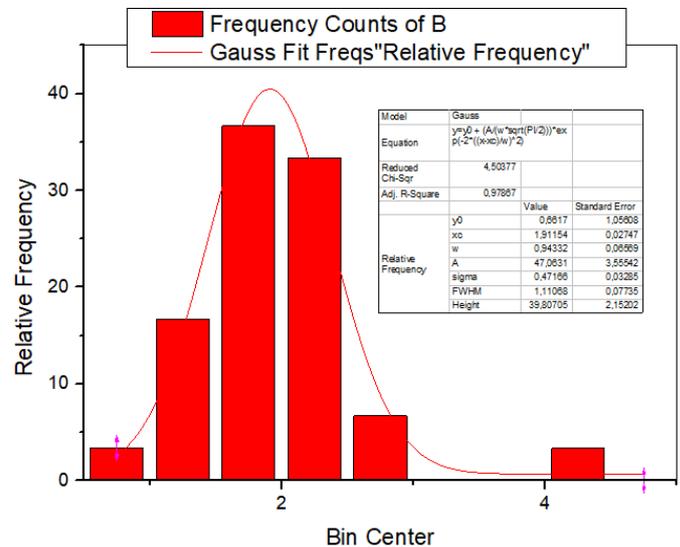


Figure 6.10 : Critère de Décourt (sable).

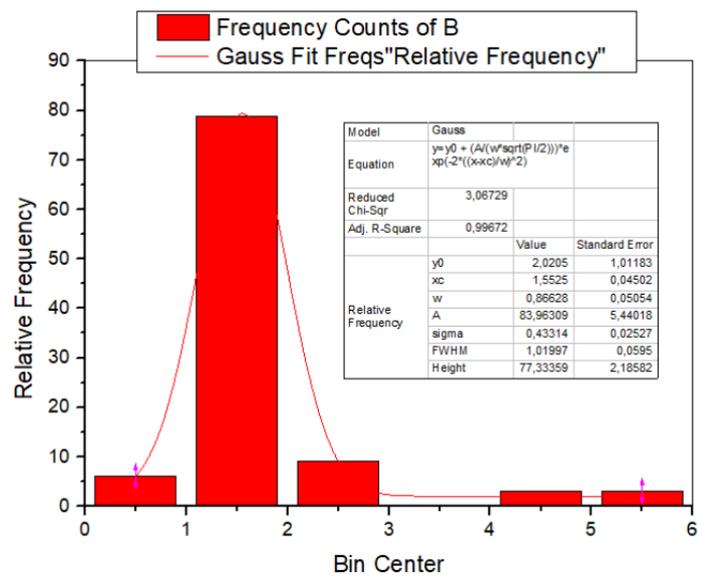


Figure 6.11 : Critère Hyperbolique (sable).

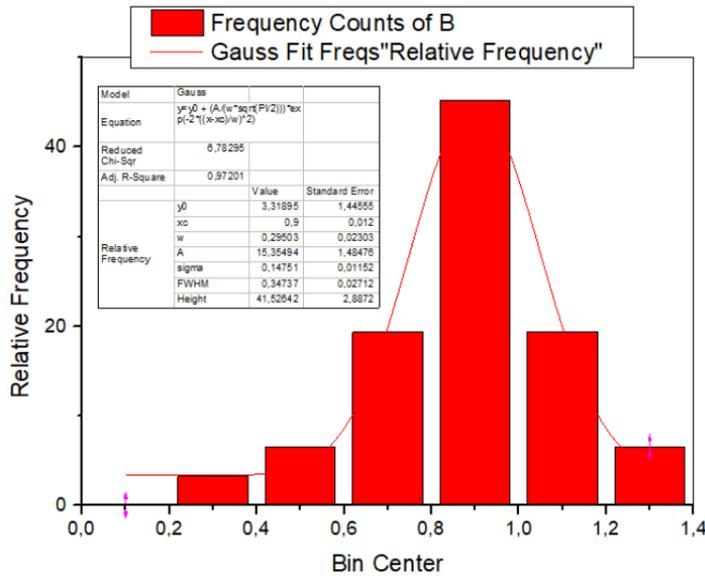


Figure 6.12 : Critère PARECT (sable).

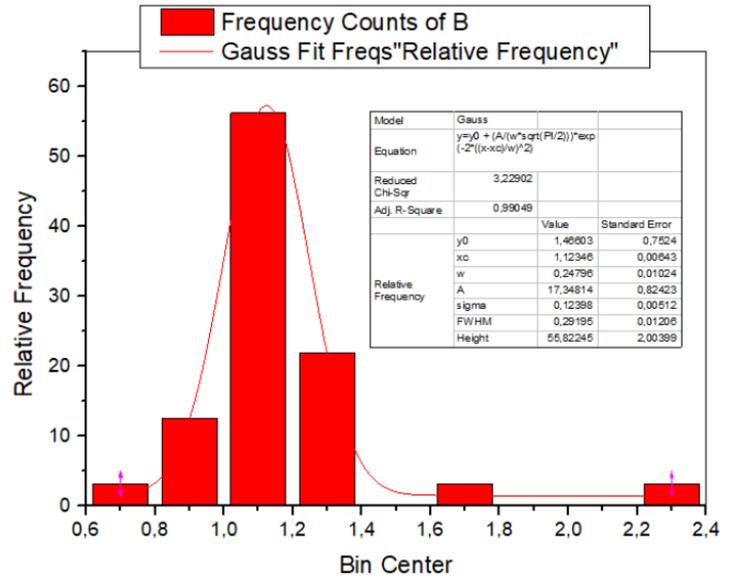


Figure 6.13 : Critère Van der veen (sable).

6.6.4. Classement général des critères de résistance latérale :

Le classement est établi selon les paramètres statistiques étudiés précédente.

6.6.4.1. Classement des critères selon la fréquence d’application :

Le tableau 6.19 ci-dessous présente le classement des critères de résistance latérale selon la fréquence d’application en %.

Tableau 6.19 : Classement des critères selon la fréquence d’application (sable).

Critères	La fréquence D’application en %	Le classement
Hyperbolique	100	1 ^{ère}
Van der veen	99.19	2 ^{ème}
PARECT	98.38	3 ^{ème}
Décourt	97.56	4 ^{ème}
De beer	90.24	5 ^{ème}
10 % de B	84.55	6 ^{ème}

Le critère hyperbolique présentes les plus grands pourcentages de fréquence 100 %, alors est les premiers aux classements selon la fréquence d’application.

6.6.4.2. Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude) :

Le tableau 6.20 regroupe le classement des critères de résistance latérale selon la moyenne.

Tableau 6.20 : Classement des critères selon la moyenne μ (sable).

Critères	La moyenne μ	Le classement
PARECT	0.900	1 ^{ère}
Van der veen	1.123	2 ^{ème}
De beer	0.453	3 ^{ème}
10 % de B	0.450	4 ^{ème}
Hyperbolique	1.552	5 ^{ème}
Décourt	1.911	6 ^{ème}

Le critère PARECT présente la valeur la plus proche à 1 (exactitude idéale), de 0.9 est donc le premier au classement selon l'exactitude.

6.6.4.3. Classement des critères selon l'écart type σ (précision) :

Le tableau 6.21 regroupe le classement des critères de résistance latérale selon l'écart type

Tableau 6.21 : Classement des critères selon l'écart type (sable).

Critères	Écart type	Le classement
Van der veen	0.124	1 ^{ère}
PARECT	0.147	2 ^{ème}
De beer	0.187	3 ^{ème}
10 % de B	0.236	4 ^{ème}
Hyperbolique	0.433	5 ^{ème}
Décourt	0.471	6 ^{ème}

Le critère Van der veen présente la valeur la plus proche de zéro (précision idéale), de 0.124, est donc le premier au classement selon la précision.

6.6.4.4. Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la résistance latérale (N_p) :

Le niveau de prévision de la résistance latérale = **prob** ($0.8 < \text{Lambda} < 1.2$).

Dans notre cas, on ne connaît pas la fonction **Prob** (couramment Prob = fonction de Gauss), car on ne peut pas ajuster l'histogramme. On revient alors à la définition fondamentale de la probabilité qui égale la fréquence relative = Nombre de cas / Nombre total de cas, et on se fixe d'une manière conventionnelle un intervalle tournant autour de 1.

Le tableau 6.22 présente le classement des critères selon le niveau de prévision.

Tableau 6.22 : Classement selon le niveau de prévision (sable).

Critères	Le niveau de prévision	Le classement
Van der veen	69	1 ^{ère}
PARECT	65	2 ^{ème}
10 % de B	25	3 ^{ème}
Hyperbolique	9	4 ^{ème}
De beer	5	5 ^{ème}
Décourt	3	6 ^{ème}

Le critère van der veen présente la meilleure valeur été égale à 69 %, est donc le premier au classement selon le niveau de prévision.

6.6.4.5. Classement général des critères de résistance latérale :

Le tableau 6.23 présente le classement général des critères de résistance latérale selon la sommation de tous les classements précédents.

Tableau 6.23 : Classement général des critères (sable).

Critères	Somme des classements	Le classement
Van der veen	6	1 ^{ère}
PARECT	8	2 ^{ème}
Hyperbolique	15	3 ^{ème}
De beer	16	4 ^{ème}
10 % de B	17	5 ^{ème}
Décourt	22	6 ^{ème}

D'après le tableau 6.23, le classement général des critères montre que le critère de **Van der veen** est le premier. Il est le meilleur critère de résistance latérale dans le sable.

6.7. Analyse statistique et classement des critères dans l'argile :

6.7.1. La fréquence d'application des critères :

Le tableau 6.24 ci-dessous présente les résultats de la fréquence en %, à partir des différents critères.

Tableau 6.24 : Résultats de la fréquence d'application des critères (argile).

Critères	10 % de B	Hyperbolique	De beer	Décourt	PARECT	Van der veen
La fréquence (%)	44.73	100	52.63	89.47	92.11	100

Comme le montre le tableau le critère Hyperbolique, Van der Veen, représentent les plus grands pourcentages de fréquence 100 %. Le critère 10 % B représente le petit pourcentage de fréquence 44.73%.

6.7.2. Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante :

Le tableau 6.25 ci-dessous contient les pourcentages des valeurs de λ supérieure à 1 (surestimation) et inférieure à 1 (sous-estimation) pour chaque critère étudié.

Tableau 6.25 : Répartition des valeurs de λ (argile).

Critères	Le % des valeurs de λ Supérieures à 1	Le % des valeurs de λ Inférieures à 1
10 % de B	5.88	94.12
Hyperbolique	97.37	2.63
De beer	5.00	95.00
Décourt	97.06	2.94
PARECT	48.57	51.43
Van der veen	94.74	5.26

Le critère De beer présente le plus grand pourcentage des valeurs sous-estimé ($\lambda < 1$) 95%, Il est donc considéré comme la plus sûr des valeurs du rapport $Ql(\text{critère}) / Ql$ moyenne inférieure à 1.

Le critère Décourt présente le plus grand pourcentage des valeurs sous-estimé ($\lambda > 1$) 97.37%, Il est donc considéré comme la plus sûr des valeurs du rapport $Ql(\text{critère}) / Ql$ moyenne supérieures à 1.

6.7.3. Étude statistique du rapport de résistance latérale :

Le tableau 6.26 ci-dessous présente les résultats de l'étude statistique de λ pour chaque critère.

Le tableau 6.26 : Les résultats de l'étude statistique de λ (argile).

Critères	λ moyenne	Écart type	COV (%)	La médiane	La marge
10 % de B	0.691	0.196	28.44	0.679	[0.214; 1.011]
Hyperbolique	1.579	0.391	24.73	1.531	[0.333; 2.768]
De beer	0.827	0.914	100	0.674	[0.196; 4.643]
Décourt	1.688	0.356	21.08	1.667	[0.337; 2.460]
PARECT	1.017	0.226	22.20	0.991	[2.224; 1.366]
Van der veen	1.230	0.339	27.55	1.167	[2.248; 2.461]

Il est remarquable, d'après l'analyse statistique de λ illustrée au tableau 6.26, que : Les valeurs de λ moyenne sont comprises entre 0.691 et 1.579. Le coefficient de variation COV paraît un pourcentage variant entre 21.08% et 100%, ce qu'explique une dispersion variable d'un critère à l'autre, le critère de Décourt donne la plus faible dispersion 21.08%, et le critère de De beer donne la plus grande dispersion 100% et plus grande marge et donc le plus grand d'écart type (SD).

Le tableau 6.27 ci-dessous présente les résultats des paramètres statistiques résultant de l'ajustement de l'histogramme de λ pour un critère donné par la probabilité de gauss. L'ajustement est fait par logiciel Origin Pro 9.0

Tableau 6.27 : Résultats des paramètres statistiques (argile).

Critères	La moyenne μ	Écart type σ	Fréquence Relative max	Coefficient de Régression R (%)
10 % de B	0.553	0.196	23 .60	-
Hyperbolique	1.75	0.391	47.37	63.31
De beer	0.5	0.914	95	-
Décourt	1.74	0.356	61.60	59.25
PARECT	1.019	0.231	36.055	74.49
Van der veen	1.25	0.339	84.21	81.31

Le coefficient de régression R% étant dans les critères de, Van der veen, PARECT, ont un pourcentage supérieur à 81.31%, 74.49%, respectivement, ce qui signifie une bonne qualité d'ajustement.

On peut voir que les valeurs μ moyennes pour les critères PARECT et Van der veen sont les plus proche de 1, 1.019 et 1.25 (exactitude idéale), respectivement. Les valeurs d'écart types pour les critères de 10 % de B et PARECT sont les plus proches de zéro à 0.196 et 0.231, respectivement (bonne exactitude).

Les figures ci-dessous présentent les histogrammes des critères de résistance latérale qui ajustés par la loi de gauss, appliqué par logiciel Origin Pro 9.0 (cas d'argile).

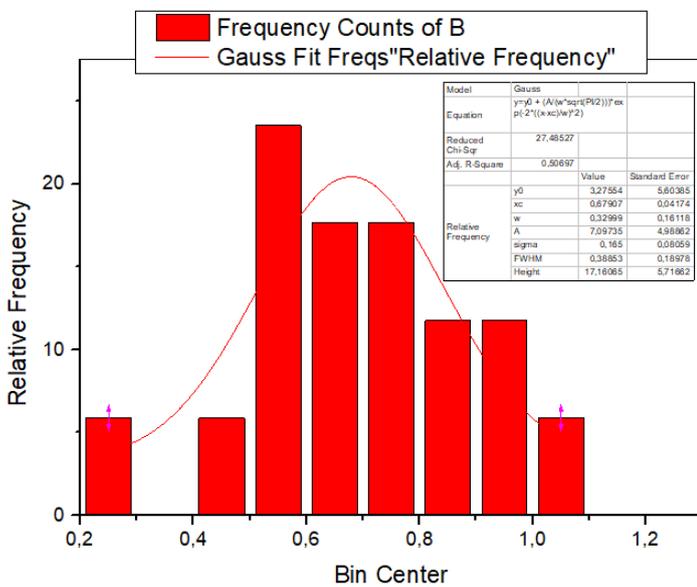


Figure 6.14 : Critère de 10 % de B (argile).

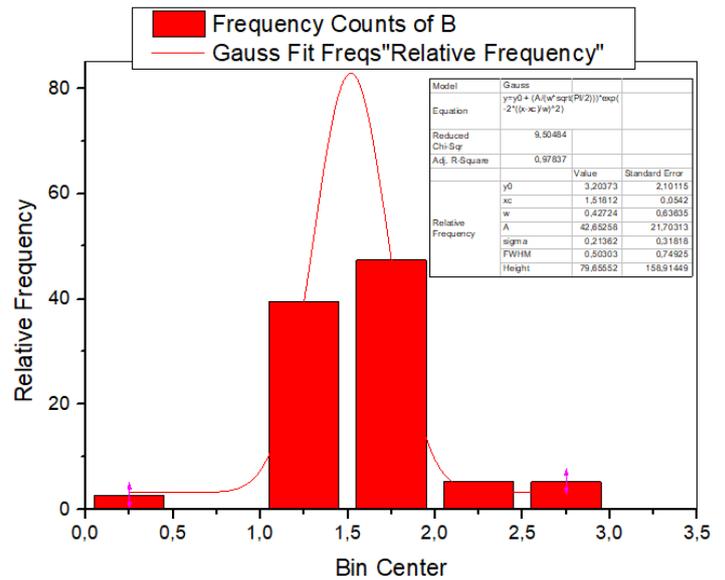


Figure 6.15 : Critère de Décourt (argile).

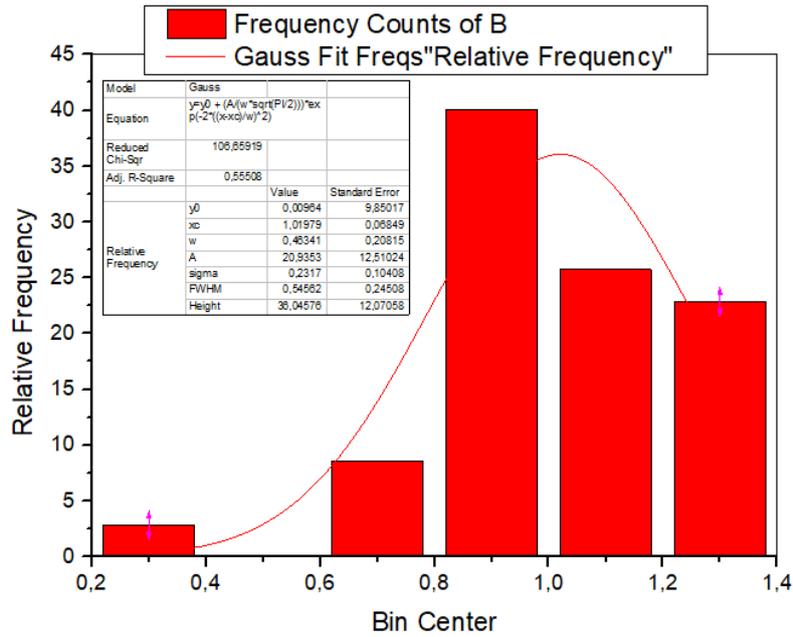


Figure 6.16 : Critère de PARECT (argile).

6.7.4. Classement général des critères de résistance latérale :

Le classement est établi selon les paramètres statistiques étudiés précédente.

6.7.4.1. Classement des critères selon la fréquence d’application :

Le tableau 6.28 ci-dessous présente le classement des critères de résistance latérale selon la fréquence d’application en %.

Tableau 6.28 : Classement des critères selon la fréquence d’application (argile).

Critères	La fréquence D’application en %	Le classement
Hyperbolique	100	1 ^{ère}
Van der veen	100	1 ^{ème}
PARECT	92.11	2 ^{ème}
Décourt	89.47	3 ^{ème}
De beer	52.63	4 ^{ème}
10 % de B	44.73	5 ^{ème}

Les critères hyperbolique et van der veen présentes les plus grands pourcentages de fréquence 100 %, alors est les premiers aux classements selon la fréquence d'application.

6.7.4.2. Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude) :

Le tableau 6.29 regroupe le classement des critères de résistance latérale selon la moyenne.

Tableau 6.29 : Classement des critères selon la moyenne μ (argile).

Critères	La moyenne μ	Le classement
PARECT	1.019	1 ^{ère}
Van der veen	1.250	2 ^{ème}
10 % de B	0.553	3 ^{ème}
De beer	0.500	4 ^{ème}
Décourt	1.740	5 ^{ème}
Hyperbolique	1.750	6 ^{ème}

Le critère PARECT présente la valeur la plus proche à 1 (exactitude idéale), de 1.019 est donc le premier au classement selon l'exactitude.

6.7.4.3. Classement des critères selon l'écart type σ (précision) :

Le tableau 6.30 regroupe le classement des critères de résistance latérale selon l'écart type

Tableau 6.30 : Classement des critères selon l'écart type (argile).

Critères	Écart type	Le classement
10 % de B	0.196	1 ^{ère}
PARECT	0.231	2 ^{ème}
Van der veen	0.339	3 ^{ème}
Décourt	0.356	4 ^{ème}
Hyperbolique	0.391	5 ^{ème}
De beer	0.914	6 ^{ème}

Le critère 10 % de B présente la valeur la proche de zéro (précision idéale), de 0.196, est donc le premier au classement selon la précision.

6.7.4.4. Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la résistance latérale (N_p) :

Le tableau 6.31 présente le classement des critères selon le niveau de prévision.

Tableau 6.31 : Classement selon le niveau de prévision (argile).

Critères	Le niveau de prévision	Le classement
PARECT	66	1 ^{ère}
Van der veen	58	2 ^{ème}
10 % de B	29	3 ^{ème}
De beer	15	4 ^{ème}
Hyperbolique	3	5 ^{ème}
Décourt	0	6 ^{ème}

Le critère PARECT présente la meilleure valeur été égale à 65.7%, est donc le premier au classement selon le niveau de prévision.

6.7.4.5. Classement général des critères de résistance latérale :

Le tableau 6.32 présente le classement général des critères de résistance latérale selon la sommation de tous les classements précédents.

Tableau 6.32 : Classement général des critères (argile).

Critères	Somme des classements	Le classement
PARECT	6	1 ^{ère}
Van der veen	8	2 ^{ème}
10 % de B	12	3 ^{ème}
Hyperbolique	17	4 ^{ème}
De beer	18	5 ^{ème}
Décourt	18	5 ^{ème}

D'après le tableau 6.32, le classement général des critères montre que le critère de **PARECT** est le premier. Il est le meilleur critère de résistance latérale dans l'argile.

6.8. Analyse statistique et classement des critères dans sol multicouche :

6.8.1. La fréquence d'application des critères :

Le tableau 6.33 ci-dessous présente les résultats de la fréquence en %, à partir des différents critères.

Tableau 6.33 : Résultats de la fréquence d'application des critères (multicouche).

Critères	10 % de B	Hyperbolique	De beer	Décourt	PARECT	Van der veen
La fréquence (%)	34	100	66	90	96	100

Comme le montre le tableau le critère Hyperbolique, Van der Veen, représentent les plus grands pourcentages de fréquence 100 %. Le critère 10 % B représente le petit pourcentage de fréquence 34%.

6.8.2. Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante :

Le tableau 6.34 ci-dessous contient les pourcentages des valeurs de λ supérieure à 1 (surestimation) et inférieure à 1 (sous-estimation) pour chaque critère étudié.

Tableau 6.34 : Répartition des valeurs de λ (multicouche).

Critères	Le % des valeurs de λ Supérieures à 1	Le % des valeurs de λ Inférieures à 1
10 % de B	0	100
Hyperbolique	100	0
De beer	6.06	93.94
Décourt	100	0
PARECT	41.67	58.33
Van der veen	86	14

Le critère 10 % de B présente le plus grand pourcentage des valeurs sous-estimé ($\lambda < 1$) 100%, Il est donc considéré comme la plus sûr des valeurs du rapport $QI(\text{critère}) / QI$ moyenne inférieure à 1.

Les critères Hyperbolique, Décourt présentes les plus grands pourcentages des valeurs sous-estimé ($\lambda > 1$) 100%, Il est donc considéré comme les plus sûr des valeurs du rapport $QI(\text{critère}) / QI$ moyenne supérieures à 1.

6.8.3. Étude statistique du rapport de résistance latérale :

Le tableau 6.35 ci-dessous présente les résultats de l'étude statistique de λ pour chaque critère.

Le tableau 6.35 : Les résultats de l'étude statistique de λ (multicouche).

Critères	λ moyenne	Écart type	COV (%)	La médiane	La marge
10 % de B	0.621	0.208	33.45	0.705	[0.271; 0.938]
Hyperbolique	1.613	0.363	22.48	1.520	[1.127; 2.787]
De beer	0.592	0.264	44.58	0.535	[0.269; 1.448]
Décourt	1.833	0.434	23.69	1.710	[1.157; 3.019]
PARECT	0.967	0.303	31.34	0.951	[0.499; 2.156]
Van der veen	1.208	0.286	23.65	1.135	[0.917; 2.462]

Il est remarquable, d'après l'analyse statistique de λ illustrée au tableau 6.35, que : Les valeurs de λ moyenne sont comprises entre 0.592 et 1.833. Le coefficient de variation COV paraît un pourcentage variant entre 22.48% et 44.58%, ce qu'explique une dispersion variable d'un critère à l'autre, le critère Hyperbolique donne la plus faible dispersion 22.48%, et le critère de De beer donne la plus grande dispersion 44.58% et plus grande marge et donc le plus grand d'écart type (SD).

Le tableau 6.36 ci-dessous présente les résultats des paramètres statistiques résultant de l'ajustement de l'histogramme de λ pour un critère donné par la probabilité de gauss. L'ajustement est fait par logiciel Origin Pro 9.0 (multicouche).

Tableau 6.36 : Résultats des paramètres statistiques (multicouche).

Critères	La moyenne μ	Écart type σ	Fréquence Relative max	Coefficient de Régression R (%)
10 % de B	0.621	0.334	-	-
Hyperbolique	1.44	0.154	38.22	96.43
De beer	0.5	0.264	30.3	-
Décourt	1.596	0.215	24.07	86.48
PARECT	0.965	0.193	33.553	89.61
Van der veen	1.11	0.121	56.208	99.5

Le coefficient de régression R% étant dans les critères de, Van der veen, Hyperbolique, ont un pourcentage supérieur à 99.5%, 96.43%, respectivement, ce qui signifie une bonne qualité d'ajustement.

On peut voir que les valeurs μ moyennes pour les critères PARECT et Van der veen sont les plus proche de 1, 0.965 et 1.11 (exactitude idéale), respectivement. Les valeurs d'écart types pour les critères de Van der veen et PARECT sont les plus proches de zéro à 0.121 et 0.193, respectivement (bonne exactitude).

Les figures ci-dessous présentent les histogrammes des critères de résistance latérale qui ajustés par la loi de gauss, appliqué par logiciel Origin Pro 9.0 (multicouche).

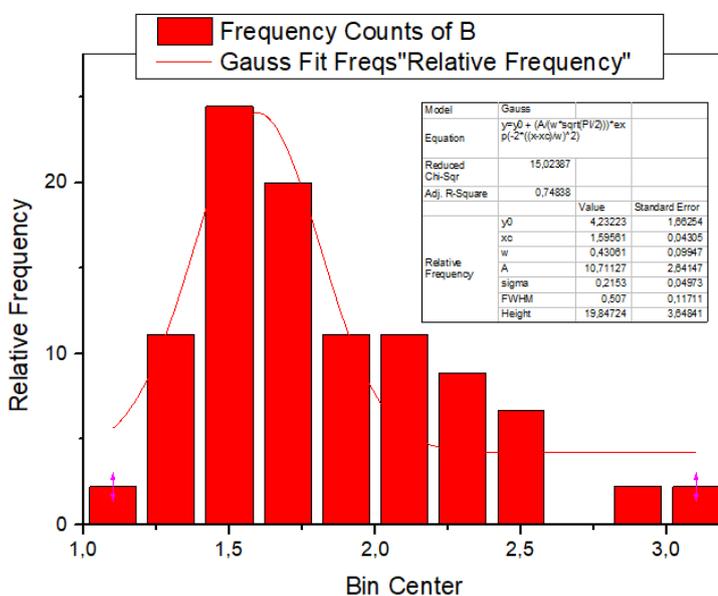


Figure 6.17 : Critère de Décourt (multicouche).

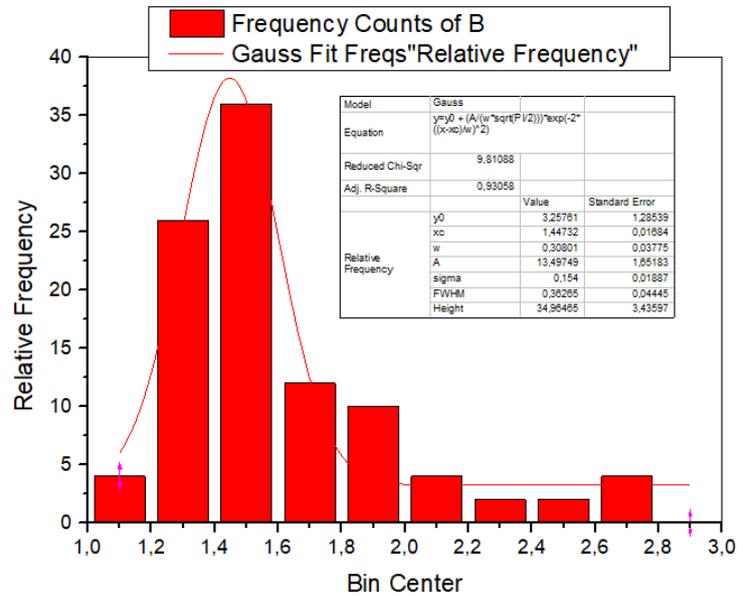


Figure 6.18 : Critère Hyperbolique (multicouche).

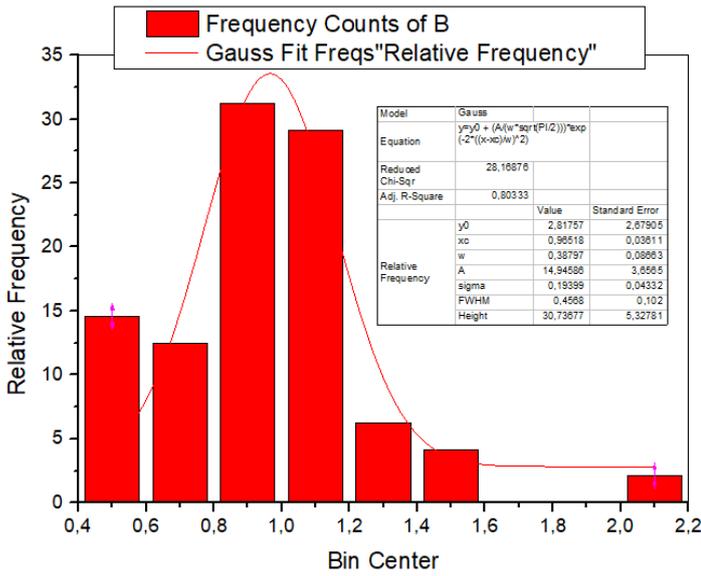


Figure 6.19 : Critère PARECT (multicouche).

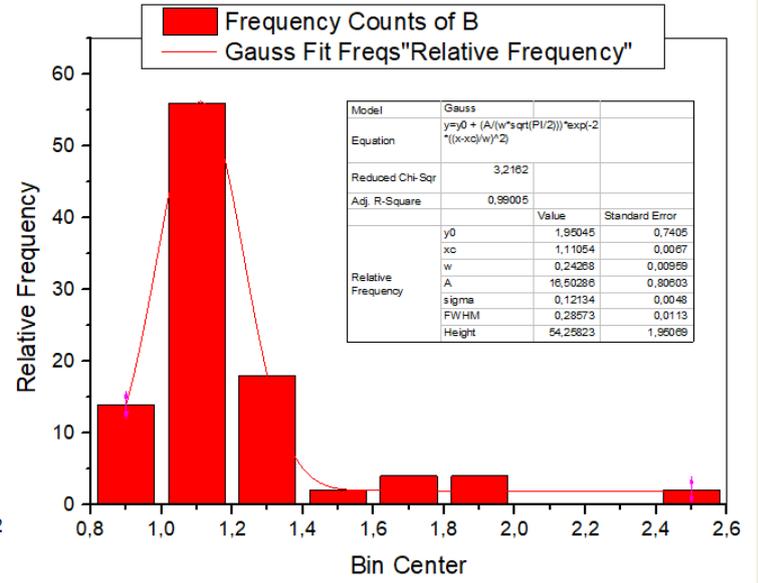


Figure 6.20 : Critère Van der Veen (multicouche).

6.8.4. Classement général des critères de résistance latérale :

Le classement est établi selon les paramètres statistiques étudiés précédente.

6.8.4.1. Classement des critères selon la fréquence d’application :

Le tableau 6.37 ci-dessous présente le classement des critères de résistance latérale selon la fréquence d’application en %.

Tableau 6.37 : Classement des critères selon la fréquence d’application (multicouche).

Critères	La fréquence D’application en %	Le classement
Hyperbolique	100	1 ^{ère}
Van der Veen	100	1 ^{ème}
PARECT	96	2 ^{ème}
Décourt	90	3 ^{ème}
De beer	66	4 ^{ème}
10 % de B	34	5 ^{ème}

Les critères hyperbolique et van der veen présentes les plus grands pourcentages de fréquence 100 %, alors est les premiers aux classements selon la fréquence d'application.

6.8.4.2. Classement des critères selon la moyenne μ (l'exactitude) :

Le tableau 6.38 regroupe le classement des critères de résistance latérale selon la moyenne.

Tableau 6.38 : Classement des critères selon la moyenne μ (multicouche).

Critères	La moyenne μ	Le classement
PARECT	0.965	1 ^{ère}
Van der veen	1.110	2 ^{ème}
10 % de B	0.621	3 ^{ème}
Hyperbolique	1.440	4 ^{ème}
De beer	0.500	5 ^{ème}
Décourt	1.596	6 ^{ème}

Le critère PARECT présente la valeur la plus proche à 1 (exactitude idéale), de 0.965 est donc le premier au classement selon l'exactitude.

6.8.4.3. Classement des critères selon l'écart type σ (précision) :

Le tableau 6.39 regroupe le classement des critères de résistance latérale selon l'écart type

Tableau 6.39 : Classement des critères selon l'écart type (multicouche).

Critères	Écart type	Le classement
Van der veen	0.121	1 ^{ère}
Hyperbolique	0.154	2 ^{ème}
PARECT	0.193	3 ^{ème}
Décourt	0.215	4 ^{ème}
De beer	0.264	5 ^{ème}
10 % de B	0.334	6 ^{ème}

Le critère van der veen présente la valeur la proche de zéro (précision idéale), de 0.121, est donc le premier au classement selon la précision.

6.8.4.4. Classement des critères selon la probabilité niveau de prévision de la résistance latérale (N_p) :

Le tableau 6.40 présente le classement des critères selon le niveau de prévision.

Tableau 6.40 : Classement selon le niveau de prévision (multicouche).

Critères	Le niveau de prévision	Le classement
Van der veen	70	1 ^{ère}
PARECT	60	2 ^{ème}
10 % de B	29	3 ^{ème}
De beer	15	4 ^{ème}
Hyperbolique	4	5 ^{ème}
Décourt	2	6 ^{ème}

Le critère van der veen présente la meilleure valeur été égale à 70%, est donc le premier au classement selon le niveau de prévision.

6.8.4.5. Classement général des critères de résistance latérale :

Le tableau 6.41 présente le classement général des critères de résistance latérale selon la sommation de tous les classements précédents.

Tableau 6.41 : Classement général des critères (multicouche).

Critères	Somme des classements	Le classement
Van der veen	5	1 ^{ère}
PARECT	8	2 ^{ème}
Hyperbolique	12	3 ^{ème}
10 % de B	17	4 ^{ème}
De beer	18	5 ^{ème}
Décourt	19	6 ^{ème}

D'après le tableau 6.41, le classement général des critères montre que le critère de **Van der veen** est le premier. Il est le meilleur critère de résistance latérale dans le sol multicouche.

6.9. Analyse statistique et classement des critères dans le limon:

6.9.1. La fréquence d'application des critères :

Le tableau 6.42 ci-dessous présente les résultats de la fréquence en %, à partir des différents critères.

Tableau 6.42 : Résultats de la fréquence d'application des critères (limon).

Critères	10 % de B	Hyperbolique	De beer	Décourt	PARECT	Van der veen
La fréquence (%)	100	100	50	100	100	100

Comme le montre le tableau Presque tous les critères sont applicables avec grands pourcentages de fréquence 100 %. Sauf le critère De beer représente le petit pourcentage de fréquence 50%.

6.9.2. Étude sur-estimation et sous-estimation de rapport de capacité portante :

Le tableau 6.43 ci-dessous contient les pourcentages des valeurs de λ supérieure à 1 (surestimation) et inférieure à 1 (sous-estimation) pour chaque critère étudié.

Tableau 6.43 : Répartition des valeurs de λ (limon).

Critères	Le % des valeurs de λ Supérieures à 1	Le % des valeurs de λ Inférieures à 1
10 % de B	0	100
Hyperbolique	100	0
De beer	0	100
Décourt	100	0
PARECT	0	100
Van der veen	100	0

Les critères 10 % de B, De beer, PARECT présentent les plus grands pourcentages des valeurs sous-estimé ($\lambda < 1$) 100%, Il est donc considéré comme les plus sûr des valeurs du rapport $Ql(\text{critère}) / Ql$ moyenne inférieure à 1.

Les critères Hyperbolique, Décourt et Van der veen présentent les plus grands pourcentages des valeurs sous-estimé ($\lambda > 1$) 100%, Il est donc considéré comme les plus sûr des valeurs du rapport $Ql(\text{critère}) / Ql$ moyenne supérieures à 1.

6.9.3. Étude statistique du rapport de résistance latérale :

Le tableau 6.44 ci-dessous présente les résultats de l'étude statistique de λ pour chaque critère.

Le tableau 6.44 : Les résultats de l'étude statistique de λ (limon).

Critères	λ moyenne	Écart type	COV (%)	La médiane	La marge
10 % de B	0.272	0.257	94.49	0.272	[0.09; 0.453]
Hyperbolique	1.682	0.028	1.64	1.682	[1.662; 1.702]
De beer	0.563	-	-	0.563	-
Décourt	1.745	0.038	2.15	1.745	[1.718; 1.771]
PARECT	0.840	0.096	11.42	0.840	[0.772; 0.708]
Van der veen	1.180	0.055	4.70	1.180	[1.141; 1.219]

Il est remarquable, d'après l'analyse statistique de λ illustrée au tableau 6.44, que : Les valeurs de λ moyenne sont comprises entre 0.272 et 1.682. Le coefficient de variation COV paraît un pourcentage variant entre 1.64% et 94.49%, ce qu'explique une dispersion variable d'un critère à l'autre, le critère Hyperbolique donne la plus faible dispersion 1.64%, et le critère de 10 % de B donne la plus grande dispersion 94.49% et plus grande marge et donc le plus grand d'écart type (SD).

Le tableau 6.45 ci-dessous présente les résultats des paramètres statistiques résultant de l'ajustement de l'histogramme de λ pour un critère donné par la probabilité de gauss. L'ajustement est fait par logiciel Origin Pro 9.0 (limon).

Tableau 6.45 : Résultats des paramètres statistiques (limon).

Critères	La moyenne μ	Écart type σ	Fréquence Relative max	Coefficient de Régression R (%)
10 % de B	0.272	0.994	-	-
Hyperbolique	1.682	0.016	-	59.45
De beer	0.619	0.028	100	-
Décourt	1.749	0.038	100	57.31
PARECT	0.840	0.114	-	-
Van der veen	1.180	0.047	-	84.73

Le coefficient de régression R² étant dans le critère de, Van der veen, supérieur à 99.5%, 84.73, ce qui signifie une bonne qualité d'ajustement.

On peut voir que les valeurs μ moyennes pour les critères PARECT et Van der veen sont les plus proches de 1, 0.840 et 1.180 (exactitude idéale), respectivement. Les valeurs d'écart types pour les critères de Van der veen et PARECT sont les plus proches de zéro à 0.047 et 0.114, respectivement (bonne exactitude).

6.9.4. Classement général des critères de résistance latérale :

Dans ce cas, on ne peut pas faire de classement car la taille de l'échantillon est très faible, car cette classe ne contient que deux cas, Cela affecte les résultats d'ajustements de l'histogramme.

6.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons appliqué six critères correspondant à des essais de chargement horizontal qui nous permettent d'interpréter les courbes de chargement et ils sont les suivants critère **Hyperbolique**, critère **Décourt**, critère **de beer** (bi-logarithmique), critère **Van der Ven** (exponentiel) et le critère **10%B** et le critère **PARECT** (parabole-rectangle) que nous avons exposé d'une façon détaillée dans la partie axiale.

Après avoir effectué l'analyse statistique et classé les critères établis selon la nature de sol (sable, argile et multicouche), on constate d'après le classement général des critères de résistance latérale que :

- ⇒ Le critère de **Van der veen** est le meilleur critère dans le sol multicouche.
- ⇒ Les critères de **PARECT** est le meilleur critère dans le sable
- ⇒ Le critère de **Van der veen** est le meilleur critère dans l'argile.
- ⇒ Pas de classement dans le limon car la taille de l'échantillon est très faible.

Donc le critère de **Van der veen** c'est le meilleur critère de résistance latérale.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans ce travail, nous avons présenté l'analyse d'une base de données des essais de chargement vertical et horizontal des pieux isolés, Afin de comparer les différents critères d'estimation de la capacité portante ou de la résistance latérale, et présenter des recommandation aux ingénieurs pour estimer la capacité portante ou la résistance latérale à partir d'un essai de chargement de pieu.

Nous avons effectué une description de deux bases : une pour les essais de chargement verticaux et l'autre pour le chargement horizontal.

Nous avons fait une interprétation et on a appliqué 11 critères de capacité portante et fait une étude comparative de classement de ces critères sur une variété de sols.

Suite à l'étude statistique de rapport de capacité portante, et les données statistiques pour chaque critère, on recommande d'après le classement général des critères de capacité portante de chargement vertical que :

- ✓ le critère de **Van der veen** dans un sol multicouche.
- ✓ Les critères **10 % de B**, et **PARECT** dans le sable.
- ✓ Le critère de **10 % de B** dans l'argile.

Donc il possible de veut dire que le critère de **10 % de B** c'est le meilleur critère de capacité portante car

Et finalement pour le chargement horizontal, on recommande que :

- ✓ le critère de **Van der veen** dans un sol multicouche.
- ✓ Le critère **PARECT** dans le sable.
- ✓ Le critère de **Van der veen** dans l'argile.

Donc le critère de **Van der veen** c'est le meilleur critère de résistance latérale car ce critère proposé d'assimiler la courbe de charge-déplacement à une fonction exponentielle, alors c'est le plus proche ajustement de cette courbe de chargement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. LUC SIBILLE. « BASES DE LA GEOTECHNIQUE MODULE MXG4 IUT GENIE CIVIL ET CONSTRUCTION DURABLE ». Licence. France. 2018).
- [2]. Document technique C140 « PIEUX ET PALPLANCHES ».
- [3]. Afnor (1992) Fondations profondes pour le bâtiment, Document Technique Unifié DTU-13.2, Recueils des Normes Françaises, 1995.
- [4]. BOUAFIA, ALI. « CONCEPTION ET CALCUL DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES », (2018), pages, Algérie.
- [5]. Melle HAMDIDI TAOUS. « ÉTUDE DE COMPORTEMENT D'UNE FONDATION SUR UN GROUPE DE PIEUX », université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou(UMMTO) faculté de génie civile de la construction, (2019).
- [6]. AFNOR (1999), "Essai statique de pieu isolé sous un effort axial", Norme française, P 94- 150-1.
- [7]. Melle RAFA SIDALI. « ESSAIS DE CHARGEMENT STATIQUE VERTICAL DES PIEUX IN-SITU ET LES METHODES DE LEURS INTERPRETATIONS », Université des sciences et technologie « HOUARI BOUMEDIEN » faculté de génie civil, (2014).
- [8]. D.T.R BC, Méthode de calcul des fondations profondes, Centre de recherche national et de la recherche appliquées en génie parasismique, 1994.
- [9]. Philiponnant, G & Hubert, B (1998), Fondations et ouvrages en terre, Édition Eyrolles, Paris, 547 p.
- [10]. Caquot A et Kérisel J, Traité de mécanique des sols, Edition Gauthier-Villars 1966.
- [11]. BOUAFIA, ALI (2003), Introduction au calcul des fondations, Éditions SAB Alger 144 p.
- [12]. Bouafia,A(2005), Calcul pratique des fondations et des soutènements, Édition OPU, 246 p.

- [13]. Fascicule 62 V., (1993), Règles technique de conception et de calcul des fondations d'ouvrages du génie civil, Edition Eyrolles, février 1993.
- [14]. Olivier COMBARIEU, Estimation du frottement latéral sol-pieu à partir du pressiomètre et des caractéristiques de cisaillement, BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES - 221 - MAI-JUIN 1999 - RÉF. 4255 - PP. 37 – 54.
- [15]. Julien HABERT, Benjamin LANDRY, Sébastien BURLON. Effets du frottement négatif appréhendés par une méthode au coefficient de réaction T-Z . Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais 8 – 10 juillet 2014.
- [16]. BOUAFIA A (2010), « GENIE CIVIL : CONCEPTION ET CALCUL DES OUVRAGES ».
- [17]. BAKOUR, AZZEDDINE. « COMPORTEMENT DES FONDATIONS PROFONDES SOUS CHARGES : ASPECTS STRUCTURAUX ET GEOTECHNIQUES », École supérieure de technologie université de Québec, Montréal, (2008).
- [18]. Hansen, J.B., (1961). "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces", Danish Geotechnical Institute, Bulletin No.12 ,Copenhagen 1961, 5–9.
- [19]. « CASE HISTORY EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF DRILLED SHAFTS UNDER AXIAL AND LATERAL LOADING », University de Cornell, Editions EPRI (Electric Power Research Institute) TR104601s, 393 p.
- [20]. Broms, B. B. (1964a). "Lateral resistance of piles in cohesive soils", J. Soil Mech. Fdn. Div., Am. Soc. Civ. Engrs. 90, No . SM2, 27-63.
- [21]. Cassan, M. (1978). "Les essais in-situ en Mécanique des sols", Tome II, Applications et méthodes de calcul. Edition Eyrolles, 331 p.
- [22]. Essai de chargement statique de Pieu Batiment AADL, SARL CEDY, Laboratoire Central des Travaux Publics DRARIA, ALGER (juin 2011).
- [23]. FRANK, R. « CALCUL DES FONDATIONS SUPERFICIELLES ET PROFONDES », Technique de l'ingénieur et presse de l'ENPC, (1999).
- [24]. la norme française P94-151 « SOLS: RECONNAISSANCE ET ESSAIS (ESSAI STATIQUE DE PIEU ISOLE SOUS EFFORT TRANSVERSAL) ».

- [25]. MICHEL Bustamante ; LUIGI Gianceselli ; HENRI Salvador, *NEUVIEME CONFERENCE INTERNATIONALE SUR LES PIEUX ET LES FONDATIONS PROFONDES* (Presses de l'école nationale des ponts et chaussée), Nice 3-5 juin, 2002.
- [26]. GUOLIANG Dai ; RODRIGO Salgado ; WEIMING Gong and YANBEI Zhang, *LOAD TEST ON FULL-SCALE BORED PILE GROUPS*, Chine, 08Novembre 2012.
- [27]. GAMBIN Michel ; MAGNAN Jean-Pierre et MESTAT Philippe, *ISP5 – PRESSIO 2005* (Portance et tassement d'une fondation profonde présentation des résultats du concours de prévision), Marne-la-vallée, 22-24 aout 2005.
- [28]. ArcelorMittal *VIBROFONCAGE. GUIDE TECHNIQUE*, (Presses de l'école nationale des Pont et chaussée), 2006.
- [29]. Samuel AMAR ; Edwin WASCHKOWSKI, *LES ESSAIS DE PENETRATION DES SOLS ET LA PREVISION DU COMPORTEMENT DES FONDATION PROFONDES*, Du 24 au 26 mai 1982 à Amsterdam.
- [30]. ArcelorMittal *VIBROFONCAGE. GUIDE TECHNIQUE*, (Presses de l'école nationale des Pont et chaussée), 2006.
- [31]. Ameir, ALTAEE ; Bengt, H. FELLENIUS and Erman EVGIN, *AXIAL LOAD TRANSFER FOR PILES IN SAND I : TEST ON AN INSTRUMENTED PRECAST PILE*. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, NO. 1, PP, 11-20, 1992.
- [32]. BERIGRO M ; PAVIANI A, *CAPACITE PORTANTÉ D'UN PIEU DE TRÈS GRANDE LONGEUR FORÉ DANS DES SOLS COMPRESSIBLES*. (Comptes rendus du séminaire internationale. Fondation profonde), Mars 1991, Paris.
- [33]. Fellenius, B.H and Goudreault, P.A, *PILE DRIVING CONTRACTORS ASSOCIATION, PDCA*. (Two case histories of analysis of pile response using UniPile software), *Pile Driving Magazine*, 10(1) 91-95. 2003.
- [34]. F.S. Niazi ; P.W. Mayne and D.J. Woeller, *CASE HISTORY OF AXIAL PILE CAPACITY AND LOAD-SETTLEMENT RESPONSE BY SCPTu*. 2005.

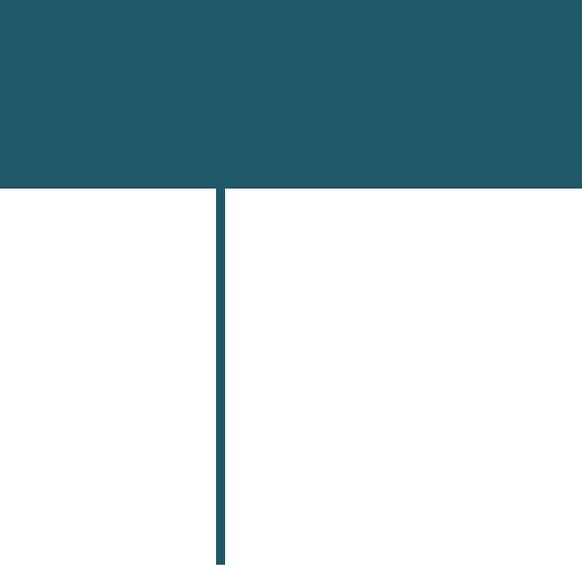
- [35]. *Fellenius, BH, Harris, D. et Anderson, DG, ESSAI DE CHARGEMENT STATIQUE SUR UN PIEU TUBULAIRE DE 45 M DE LONG A SANDPOINT, IDAHO. (Revue Canadienne de géotechnique 41(4) 613 628). 2004.*
- [36]. *M. Eid, A. Hefny, T. Sorour, Y. Zaghoul and M. Ezzat, FULL-SCALE WELL INSTRUMENTED LARGE DIAMETER BORED PILE LOAD TEST IN MULTI LAYERED SOIL: A CASE STUDY OF DAMIETTA PORT NEW GRAIN SILOS PROJECT. (International Journal of Current Engineering and Technology). Vol.8, No.1 (Jan/Feb.2018).*
- [37]. *Fei Han, S.M. ASCE1; Monica Prezzi, A.M. ASCE2; and Rodrigo Salgado, F. ASCE, STATIC AND DYNAMIC PILE LOAD TESTS ON CLOSED-ENDED DRIVEN PIPE PILE. (IFCEE 2018 GSP 294).*
- [38]. *Kania J. G., Sørensen K. K., and Fellenius B. H. ANALYSIS OF A STATIC LOADING TEST ON AN INSTRUMENTED CASED CFA PILE IN SILT AND SAND, (International Journal of Geoenvironmental Engineering Case Histories), Vol.5, Issue 3, p. 170 - 181. Doi : 10.4417/IJGCH-05-03-03. 2020.*
- [39]. *Kyuho Paik; Rodrigo Salgado; Junhwan Lee; and Bumjoo Kim, BEHAVIOR OF OPEN- AND CLOSED-ENDED PILES DRIVEN INTO SANDS, (Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering), Vol. 129, No. 4, April 1. ©ASCE, ISSN 1090-0241/2003/4-296–306.*
- [40]. *Paul W. Mayne and Fawad S. Niazi, EVALUATING AXIAL ELASTIC PILE RESPONSE FROM CONE PENETRATION TESTS, (Proceedings, CIGMAT - University of Houston -). 06 March 2009.*
- [41]. *Min-Gu Kim, BEHAVIOR AND PERFORMANCE OF ACIP PILES AS BRIDGE FOUNDATIONS. Décembre 2003.*
- [42]. *Nabil F. Ismael, Member, ASCE, AXIAL LOAD TESTS ON BORED PILES AND PILE GROUPS IN CEMENTED SANDS, (Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering), Vol. 127, No. 9, ASCE, ISSN 1090-0241/01/0009-0766–0773. Septembre, 2001.*

- [43]. Omar Benzaria, *CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES PIEUX SOUS CHARGEMENTS CYCLIQUES AXIAUX*. Université Paris-Est, 2012. Français.
- [44]. ArcelorMittal *VIBROFONCAGE*. Guide technique, (Presses de l'école nationale des Pont et chaussée), 2006.
- [45]. Fellenius, B.H., Edvardsson, F., Pettersson, J., Sabattini, M., and Wallgren, J, *PREDICTION, TESTING, AND ANALYSIS OF A 50 M LONG PILE IN SOFT MARINE CLAY*. (*Journal of the Deep Foundation Institute*), 13(2) 1-7. 2019.
- [46]. Fellenius, B.H. *RESULTS OF AN INSTRUMENTED STATIC LOADING TEST. APPLICATION TO DESIGN AND COMPILATION OF AN INTERNATIONAL SURVEY*. (*Journal of the Deep Foundation Institute*), 15(1) 71-87. 2021.
- [47]. Sung-Ryul Kim, Sung-Gyo Chung et Bengt H. Fellenius, *REPARTITION DE LA CHARGE RESIDUELLE ET DE LA RESISTANCE REELLE DE L'ARBRE POUR UN PIEU D'ESSAI INSTRUMENTE ENFONCE*. (*Revue canadienne de géotechnique*), 48(4) 583-598. 2011.
- [48]. Hideki Hirayama, *LOAD-SETTLEMENT ANALYSIS FOR BORED PILES USING HYPERBOLIC TRANSFER FONCTIONS*, (*Soils and fondations*). Vol30, No1, 55-64, Mar, 1990.
- [49]. H. Ali ; Ph. Reiffsteck ; F. Baguelin ; H. van de Graaf ; C. Bacconnet and R. Gourvès, *SETTLEMENT OF PILE USING CONE LOADING TEST : LOAD SETTLEMENT CURVE APPROACH*, (*2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*), Huntington Beach, CA, USA, May 2010.
- [50]. Hassan Ali, *L'ESSAI DE CHARGEMENT DE POINTE : UN MOYEN DE CARACTERISATION AMELIOREE DES SOLS*, (*Revue française de géotechnique N° 137*), Octobre 2012.
- [51]. THARRAFI Abderrazak, *CONTRIBUTION À L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DES PIEUX ISOLÉS EN PETITS DÉPLACEMENTS*, Blida, Novembre 2011.

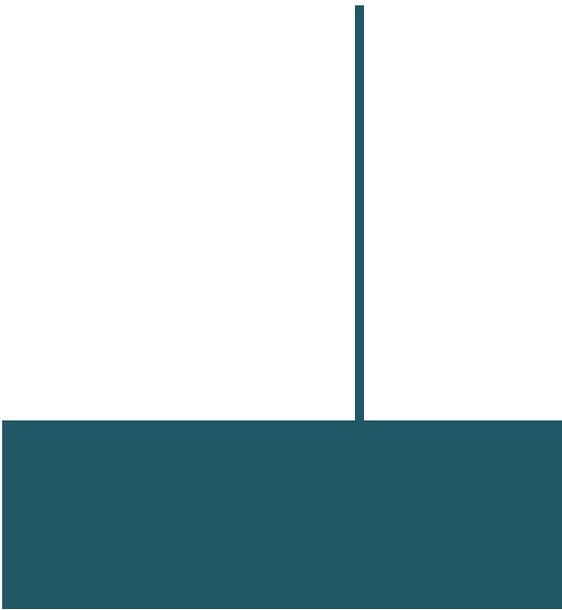
[52]. Ir A.F. van Weele, *METHODE POUR DECOMPOSER LA CHARGE PORTANTE D'UN PIEU D'ESSAI EN RESISTANCE DUE AU FROTTEMENT LATERAL LE LONG DU FUT ET EN RESISTANCE DE LA POINTE DU PIEU*, (*Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*). 1955.

[53]. An-Bin Huang ; Chao-Kuang Hsueh ; Michael W. O'Neill, S. Chern and C. Chen, *EFFECTS OF CONSTRUCTION ON LATERALLY LOADED PILE GROUPS*, (*Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 127), No. 5.May. 2001. ASCE, ISSN 1090-0241/01/0005-0385-0.397. Per page. Paper No. 21165.

[54]. ArcelorMittal *VIBROFONCAGE. GUIDE TECHNIQUE*, (*Presses de l'école nationale des Pont et chaussée*), 2006.



LES ANNEXES

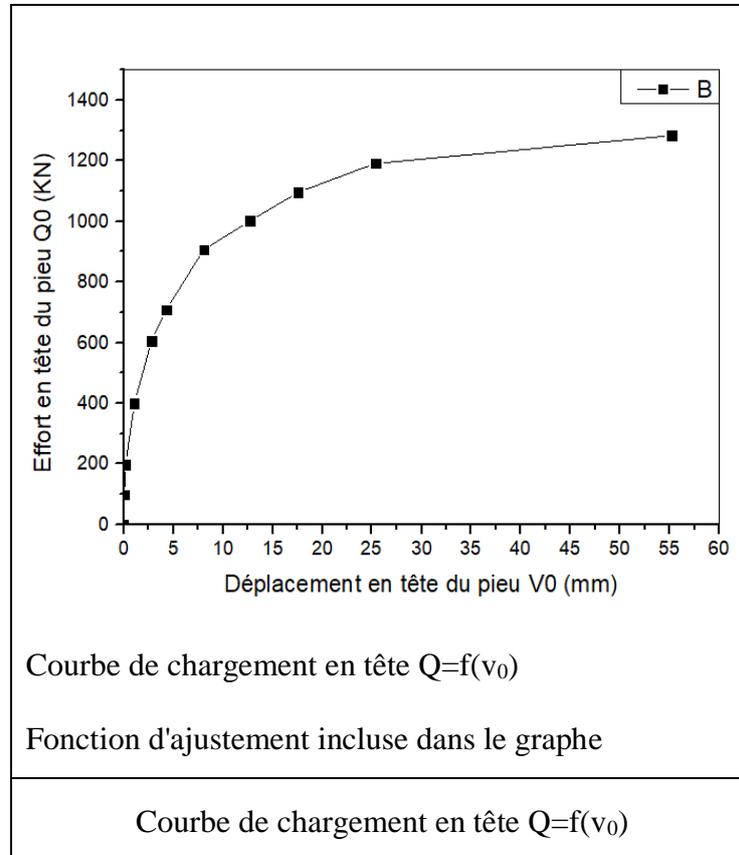


Annexe I :

Résultats de critère

PARECT

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-05-P3	Mittersheim, France	Pieu foré	Forage	7	0.473	32000	(25)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1095.94 \text{ KPa}$$

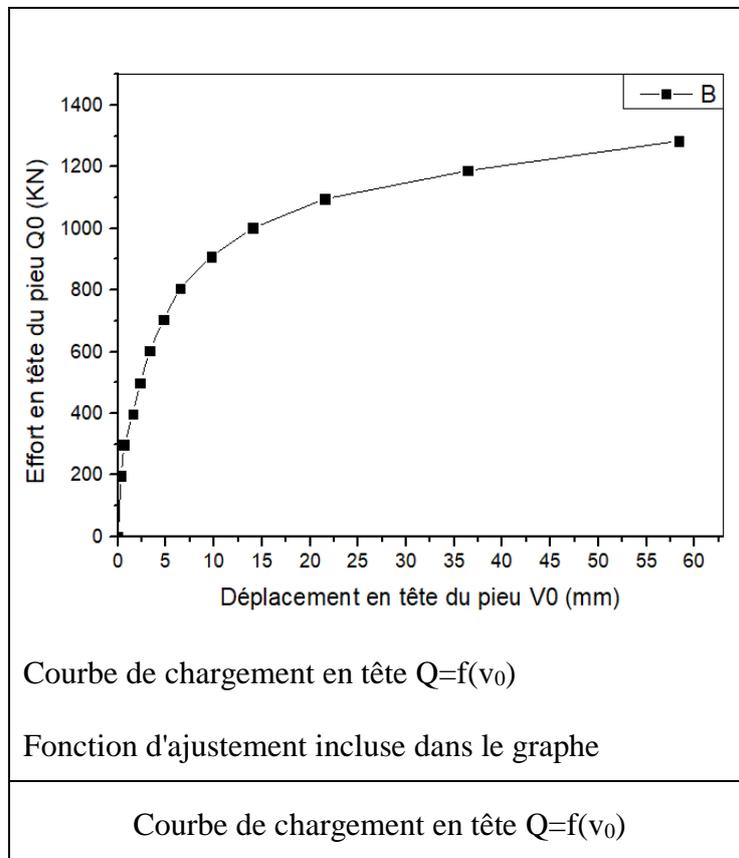
$$K_{v_0} = 225.86 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 92.64 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v_0} \times B) \times 100 = 2.05 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-05-P5	Mittersheim , France	Pieu foré	Forage	7	0.536	32000	(25)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1095.78 \text{ KPa}$$

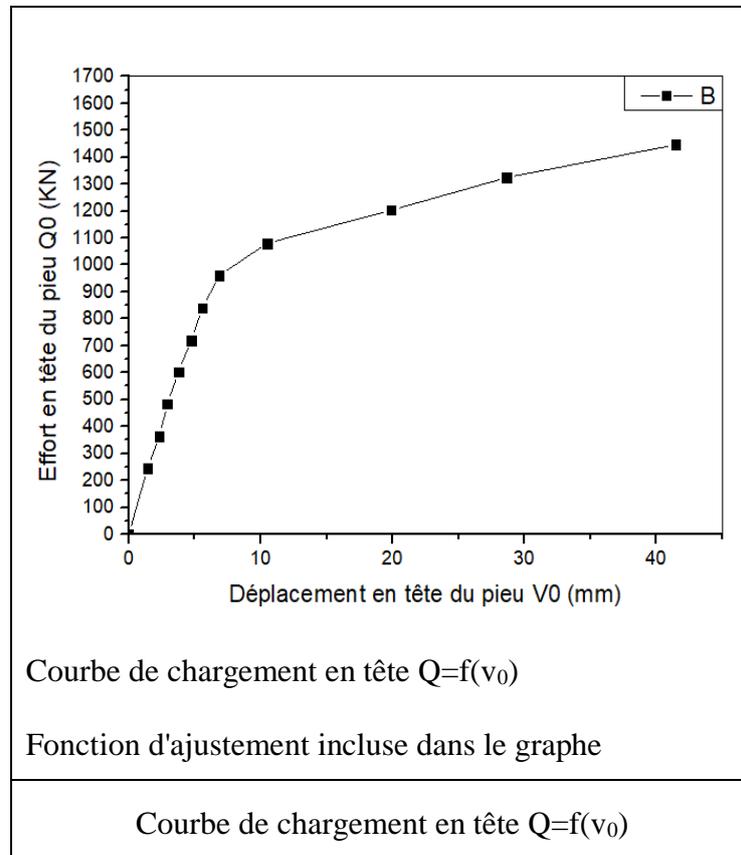
$$K_{v0} = 187.124 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.41 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.18 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-06-S	Jiangning, Nanjing, China	Pieu foré	Forage	20	0.400	32000	(26)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1324.23$$

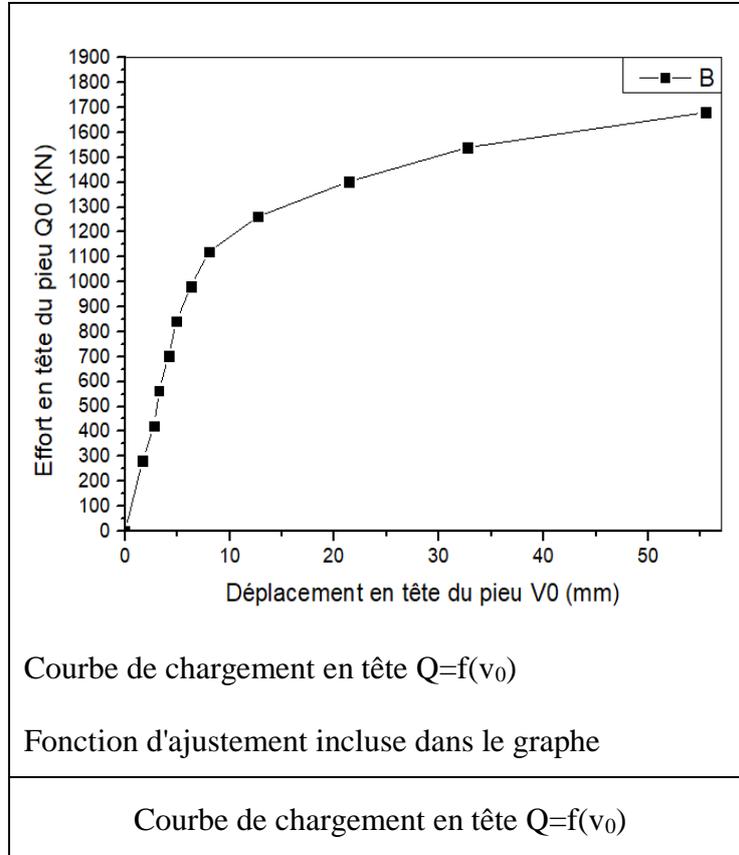
$$K_{v0} = 173.77 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.14 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 3.81 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-06-B	Jiangning, Nanjing, China	Pieu foré	Forage	24	0.400	32000	(26)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1540.52$$

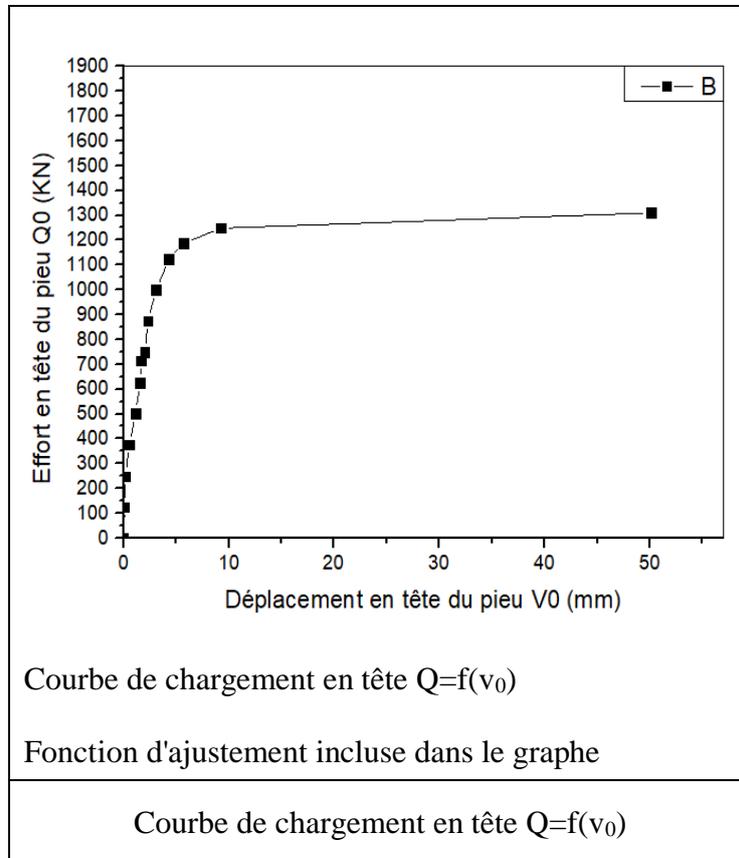
$$K_{v0} = 174.75 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 96.32 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 4.41 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-08	Merville (nord de France)	Pieu foré	Forage	12	0.500	32000	(27)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1248.68 \text{ KPa}$$

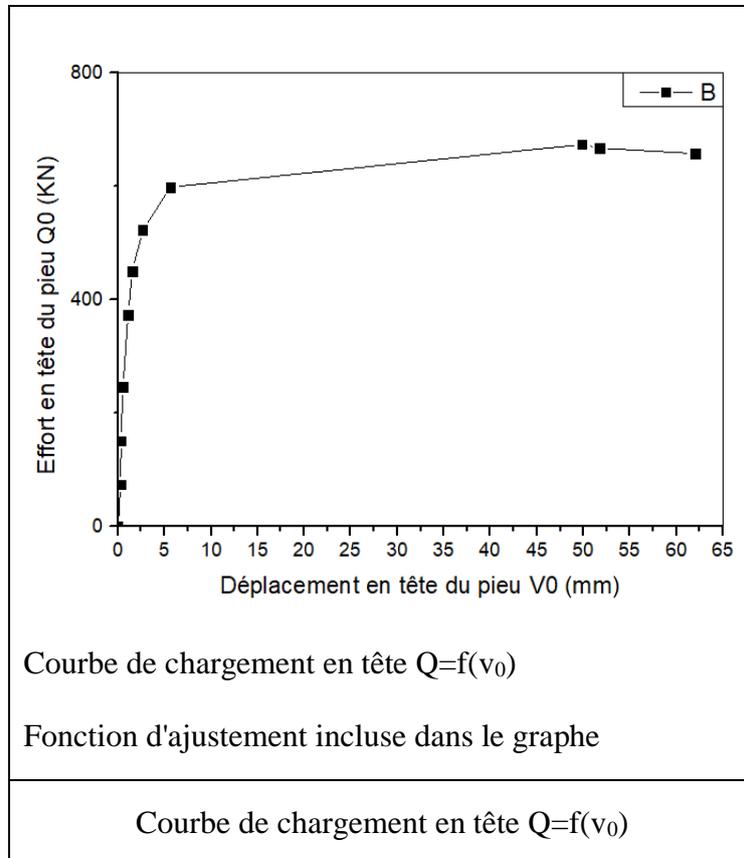
$$K_{v0} = 456.88 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 96.69 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.09 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-09	Merville (France)	Vibrofoncé	Vibro-fonçage	10.20	0.400	210*10 ³	(28)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 649.39 \text{ KPa}$$

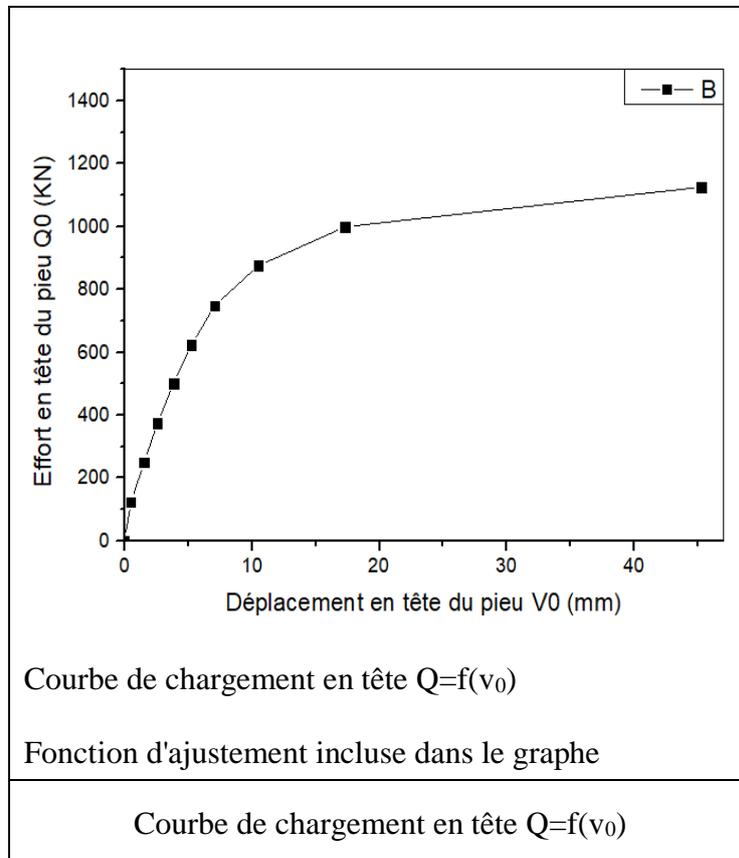
$$K_{v0} = 320.11 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 95.55 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.01 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-10	Amsterdam (Pays-Bas)	Pieu battu	Battage	14.3	0.25	32000	(29)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1062.71 \text{ KPa}$$

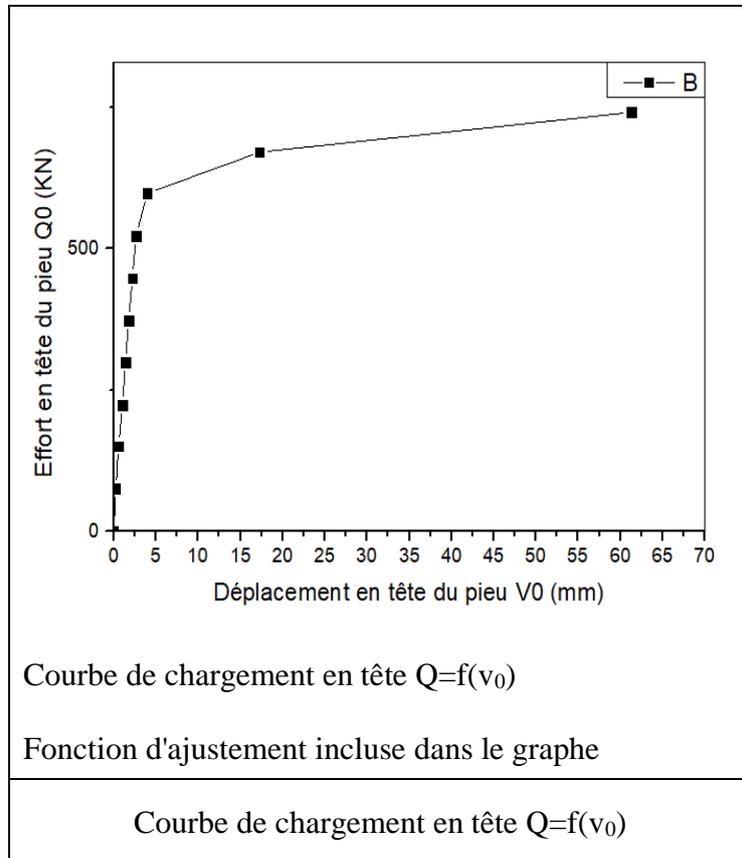
$$K_{v0} = 133.22 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.72 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 6.38 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-11	Merville (France)	Vibrofoncé	Vibro-fonçage	9.4	0.508	210*10 ³	(30)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 706.67 \text{ KPa}$$

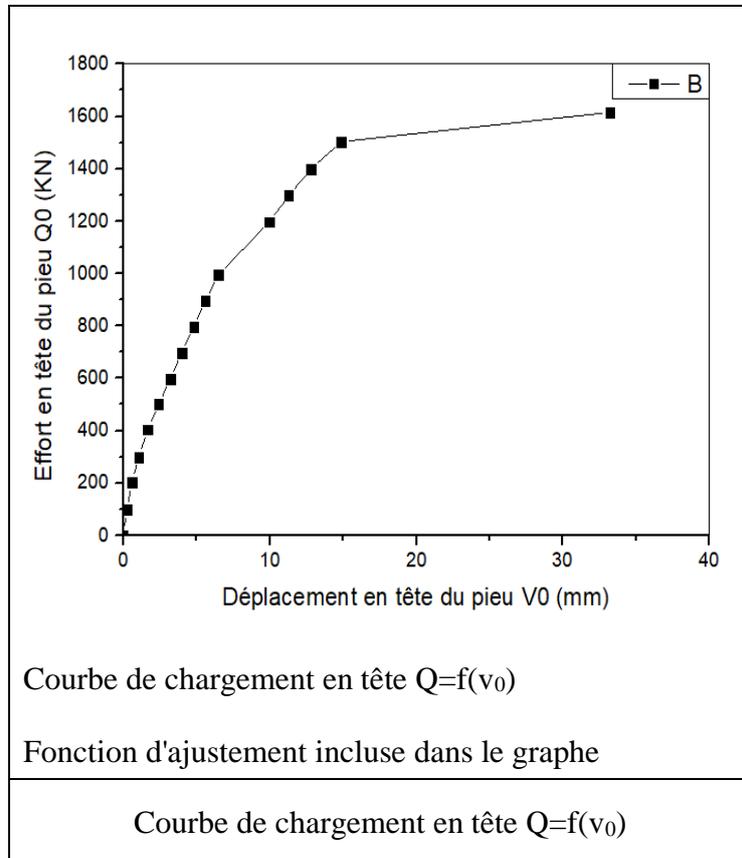
$$K_{v0} = 245.34 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 98.87 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.13 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-12	Baghdâd (Irak)	Pieu battu	Battage	12	0.285	32000	(07)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1505.30 \text{ KPa}$$

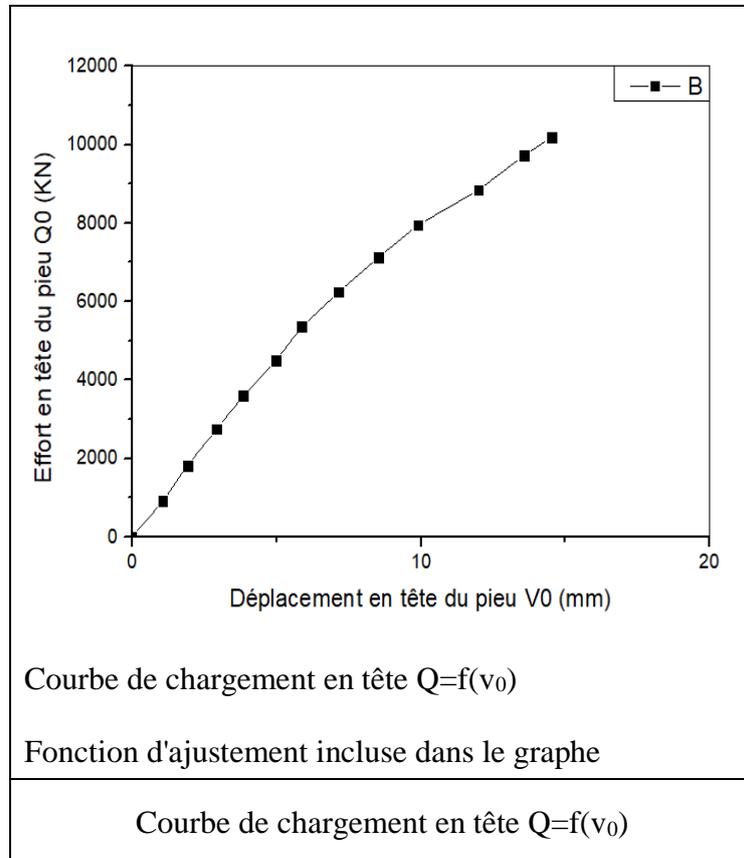
$$K_{v0} = 182.83 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.71 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 5.77 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-13	Toscane (Italie)	Pieu foré	Forage	80	1.2	32000	(08)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 9957.51 \text{ KPa}$$

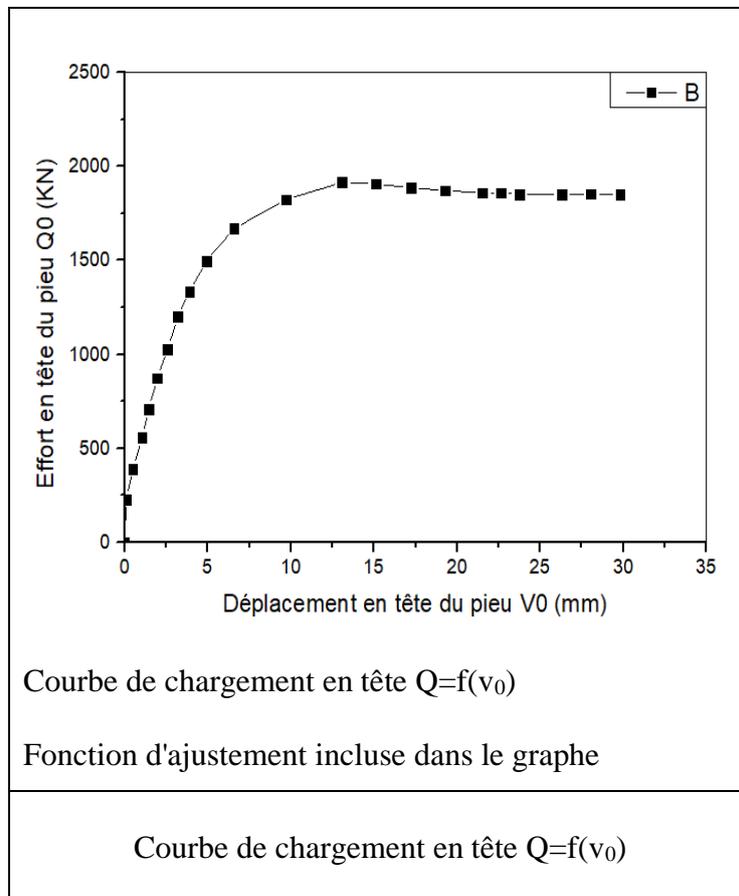
$$K_{v0} = 1104.53 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 99.64 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.5 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-14	Idaho, USA	Pieu foncé	Fonçage	45	0.406	32000	(09)



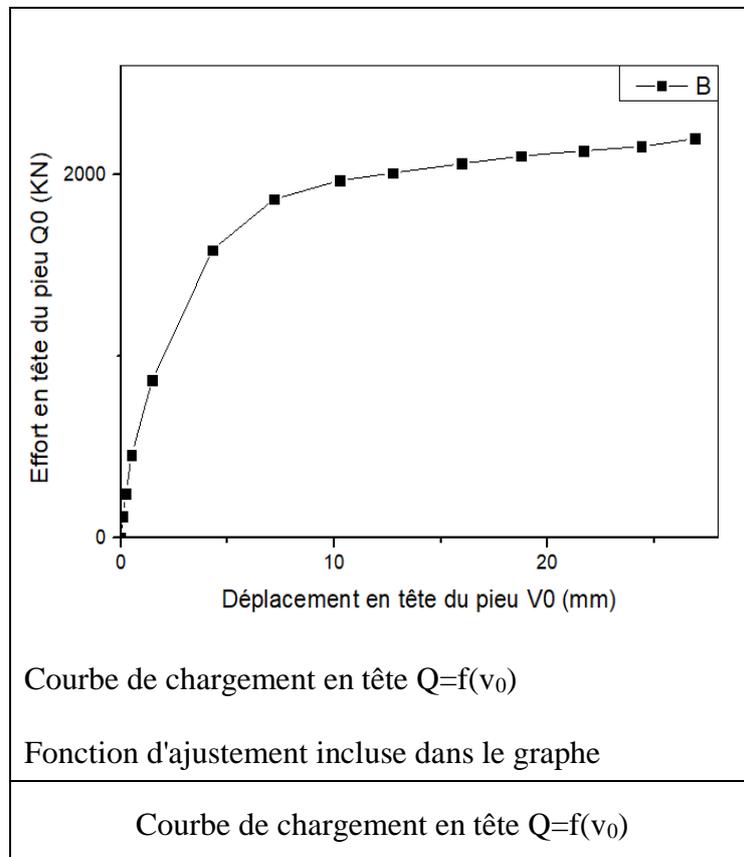
Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$Q_l = 1867.10$ KPa $K_{v0} = 435.70$ kN/mm $R (\%) = 98.27 \%$

$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.11 \%$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-15	Grimsby, Royaume-Uni	Pieu Foré	Forage	12.08	0.6	32000	(10)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 2061.9 \text{ KPa}$$

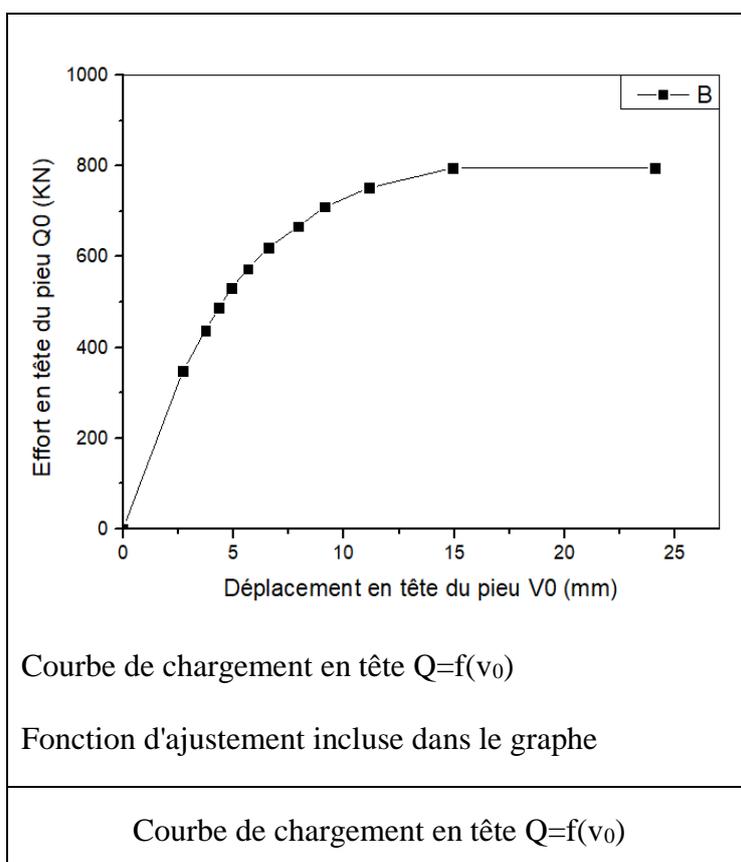
$$K_{v0} = 494.92 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.84 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.39 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-16-A	Sandpoint, Idaho, États-Unis	Pieu foncé	Fonçage	30	0.406	210*10 ³	(11)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 781.24 \text{ KPa}$$

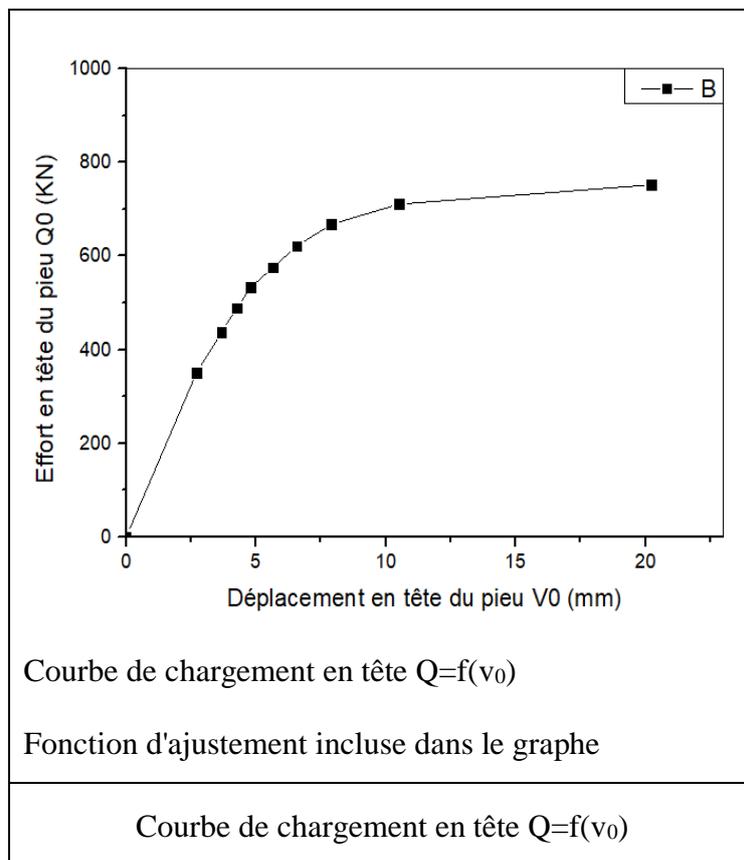
$$K_{v0} = 133.50 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 98.04 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.88 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-16-B	Sandpoint, Idaho, États-Unis	Pieu foncé	Fonçage	30	0.406	210*10 ³	(11)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 731.67 \text{ KPa}$$

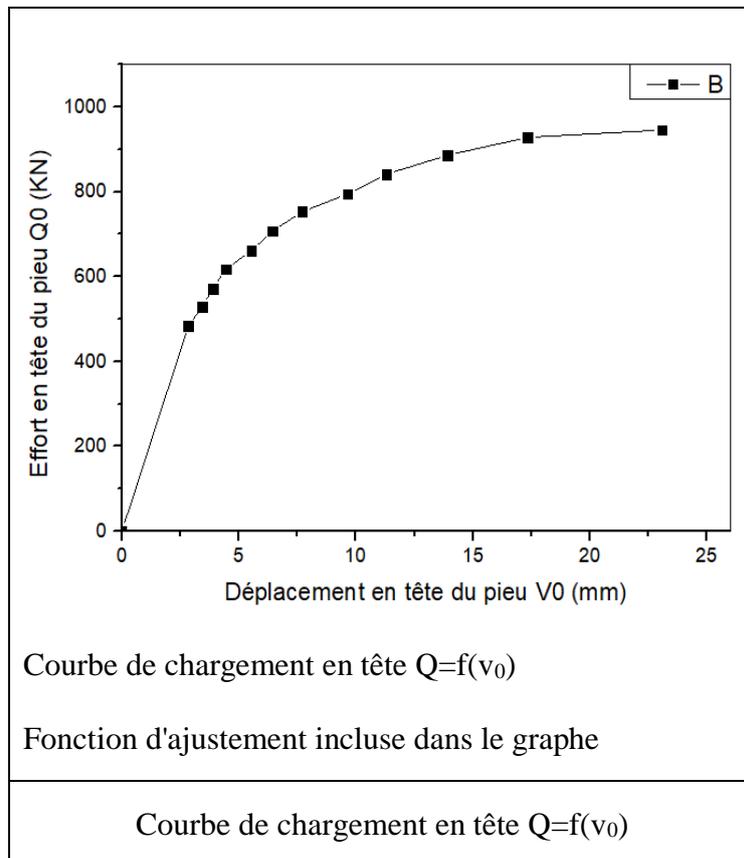
$$K_{v0} = 143.66 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 98.55 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.51 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-16-C	Sandpoint, Idaho, États-Unis	Pieu foncé	Fonçage	30	0.406	210*10 ³	(11)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 900.52 \text{ KPa}$$

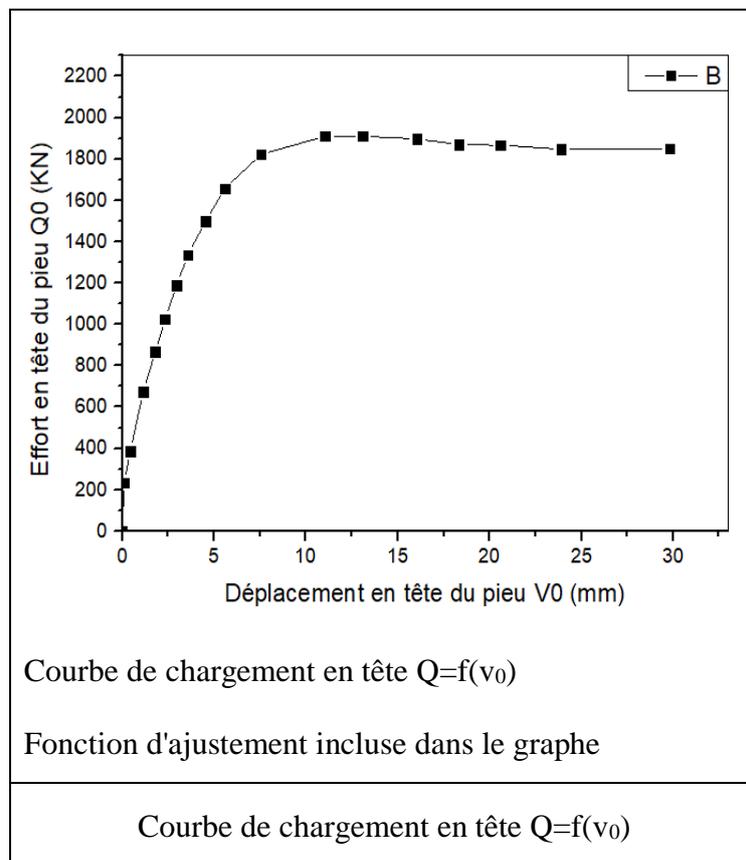
$$K_{v0} = 157.88 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 91.81 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.81 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-16-D	Sandpoint, Idaho, États-Unis	Pieu foncé	Fonçage	45	0.406	210*10 ³	(11)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1871.1 \text{ KPa}$$

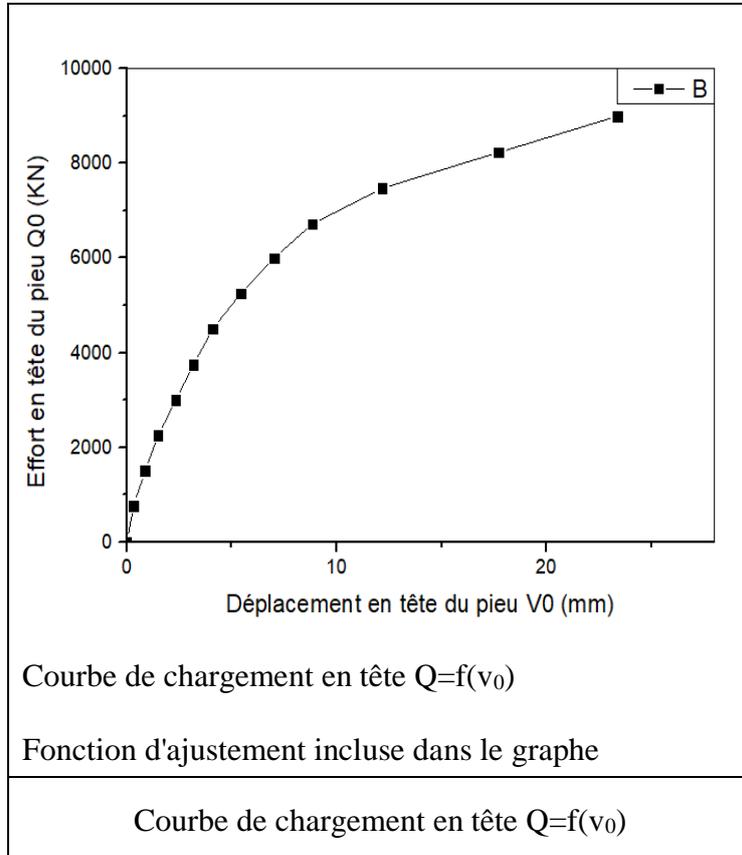
$$K_{v0} = 482.15 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 98.07 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.91 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-17	Égypt.	Pieu Foré	Forage	34	1	32000	(12)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 8236.49 \text{ KPa}$$

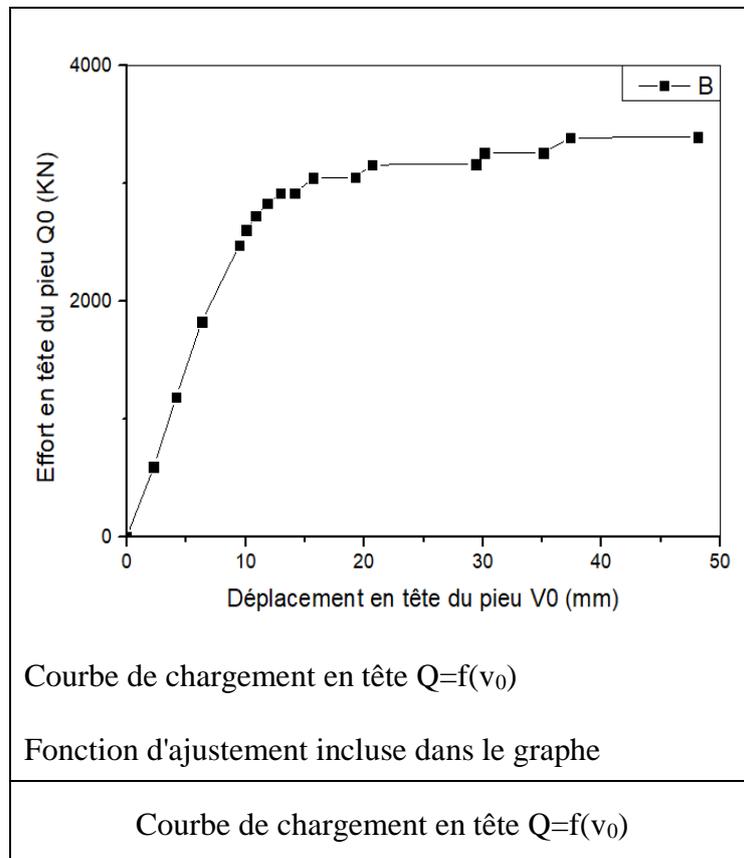
$$K_{v0} = 1181.74 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.26 \%$$

$$v_0^R / B (\%) = (2Q_l / K_{v0} \times B) \times 100 = 1.39 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-18	Indiana, USA	Pieu battu	Battage	12.19	0.356	210*10 ³	(13)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 3271.93 \text{ KPa}$$

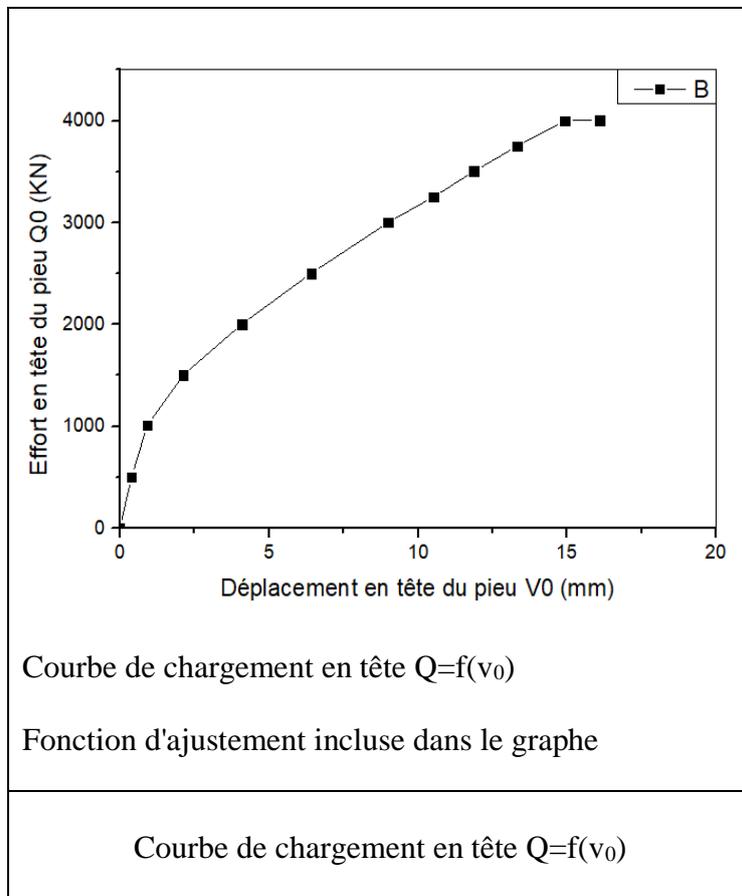
$$K_{v0} = 341.78 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 98.26 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 5.38 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-19	Vebon - Denmark	Pieu battu	Battage	12.5	0.630	32000	(14)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 4007.04 \text{ KPa}$$

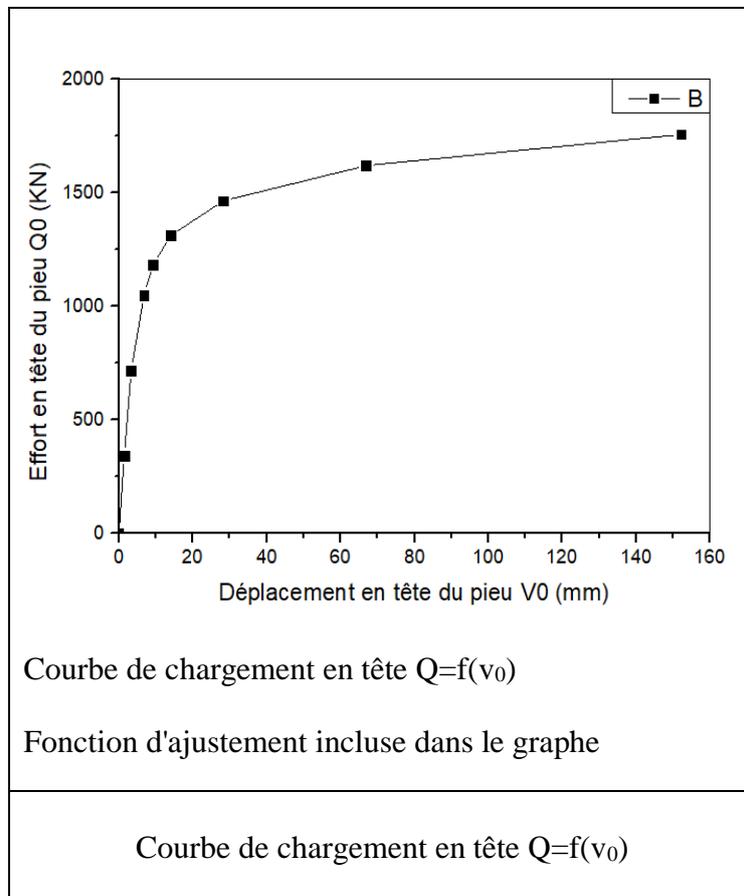
$$K_{v0} = 449.90 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 95.57 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 0.29 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-20-C	Indiana - USA	Pieu battu	Battage	8.24	0.356	32000	(15)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$Q_l = 1613.62$ KPa

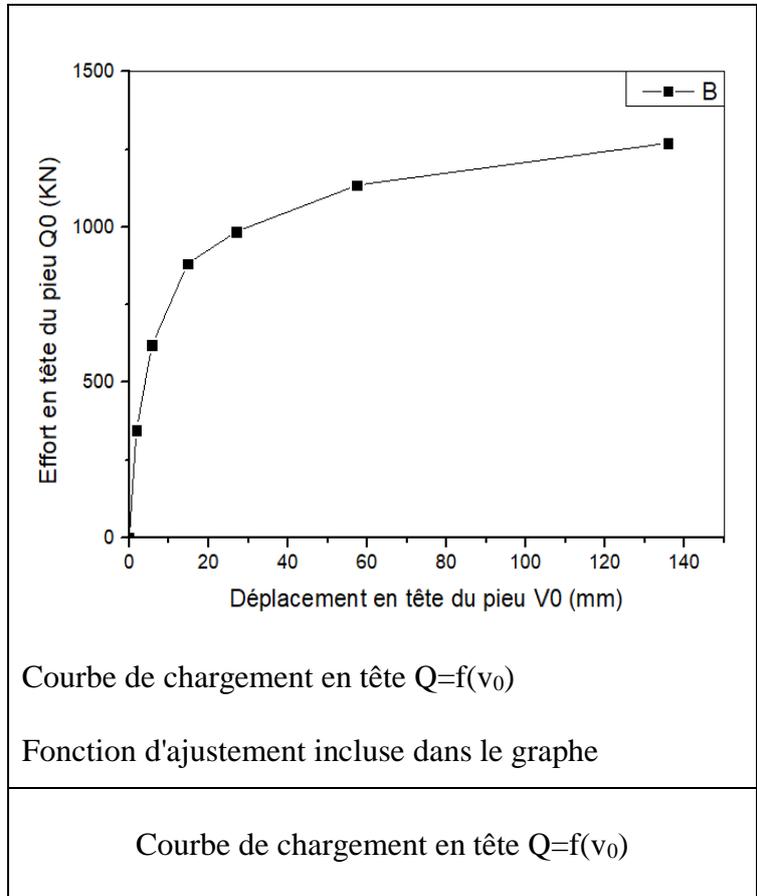
$K_{v0} = 156.25$ kN/mm

$R (\%) = 92.86 \%$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 5.8 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-20-O	Indiana - USA	Pieu battu	Battage	8.24	0.356	32000	(15)



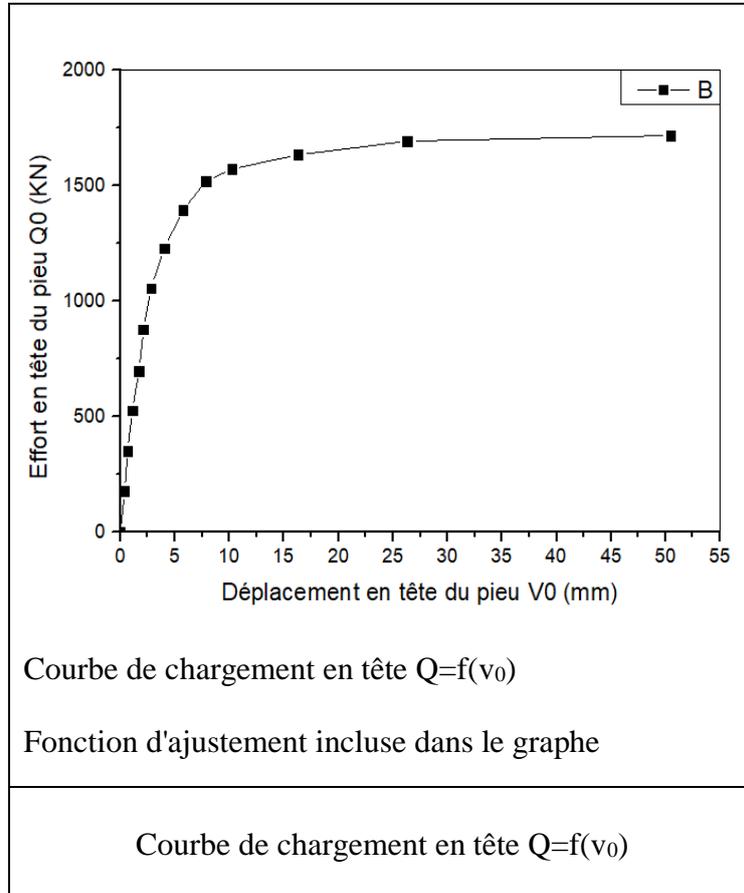
Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$Q_l = 1129.62 \text{ KPa}$
 $K_{v0} = 82.48 \text{ kN/mm}$
 $R (\%) = 88.51 \%$

$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 7.69 \%$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-21	Houston, Texas États-Unis	Pieu Foré	Forage	15.2	0.456	32000	(16)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1627.25 \text{ KPa}$$

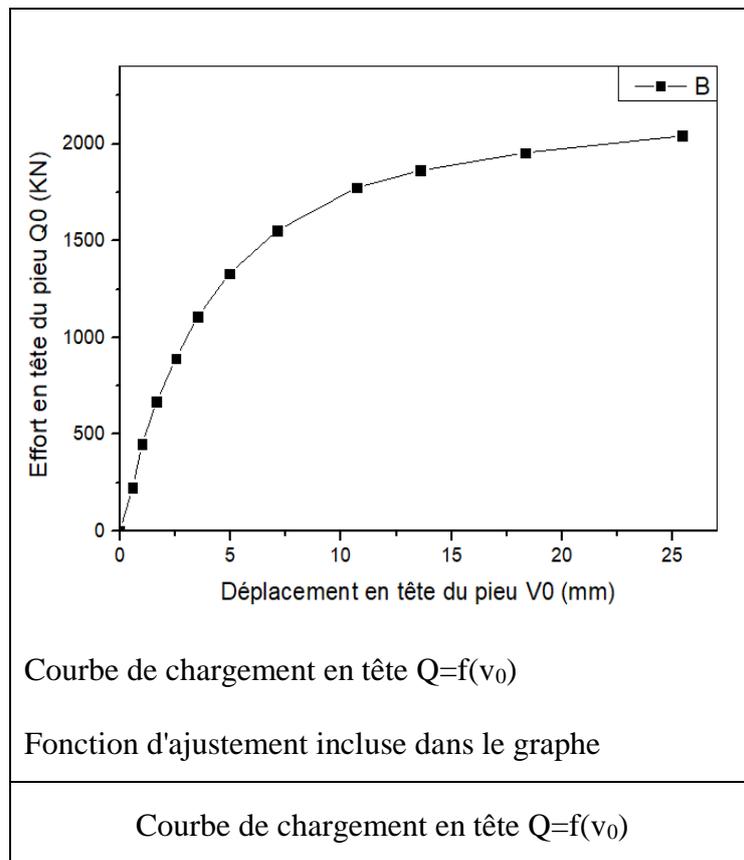
$$K_{v0} = 409.84 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.75 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.74 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-23-K	Krenek Road, Texas, États-Unis	Pieu battu	Battage	18.9	0.457	25000	(17)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1908.2 \text{ KPa}$$

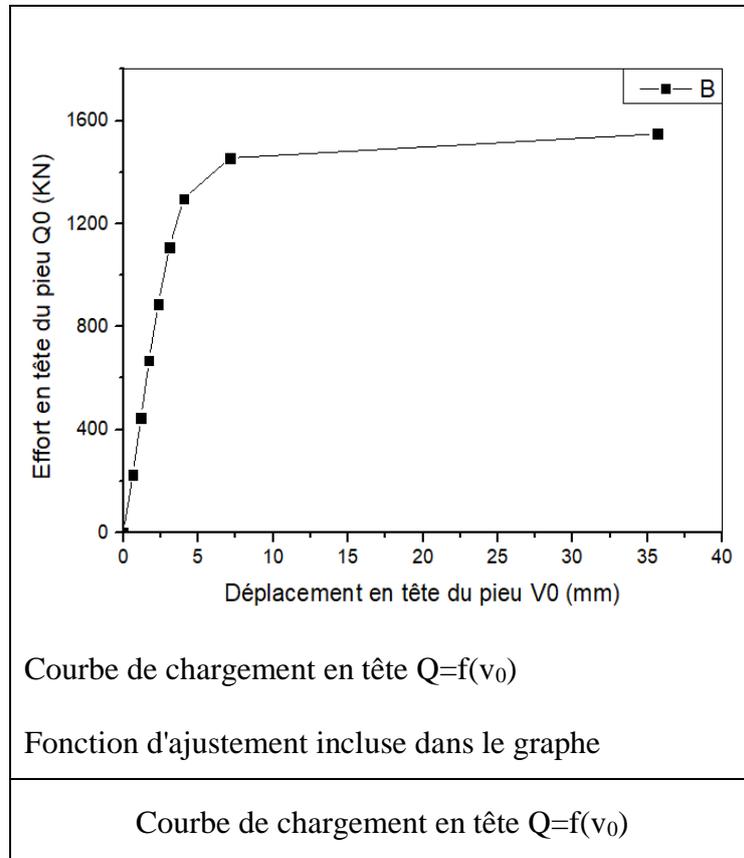
$$K_{v0} = 341.87 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.68 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.44 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-23-R	Runneburg, Allemagne	Pieu battu	Battage	14.0	0.406	35000	(17)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1501.65 \text{ KPa}$$

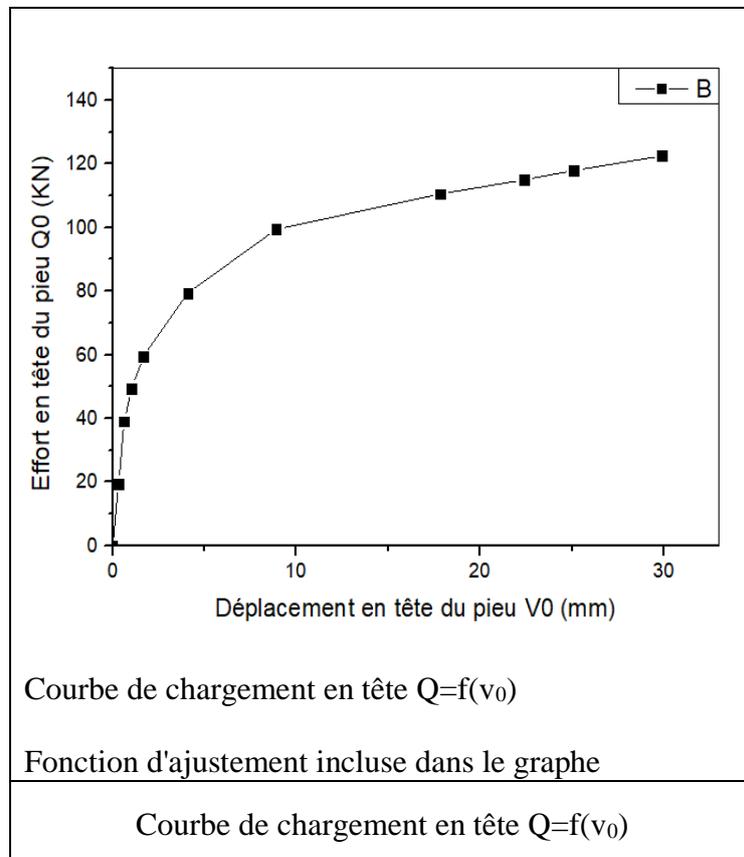
$$K_{v0} = 472.166 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 99.16 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.56 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-24	South surra, Kuwait	Pieu foré	Forage	2.25	0.1	32000	(18)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 113.10 \text{ KPa}$$

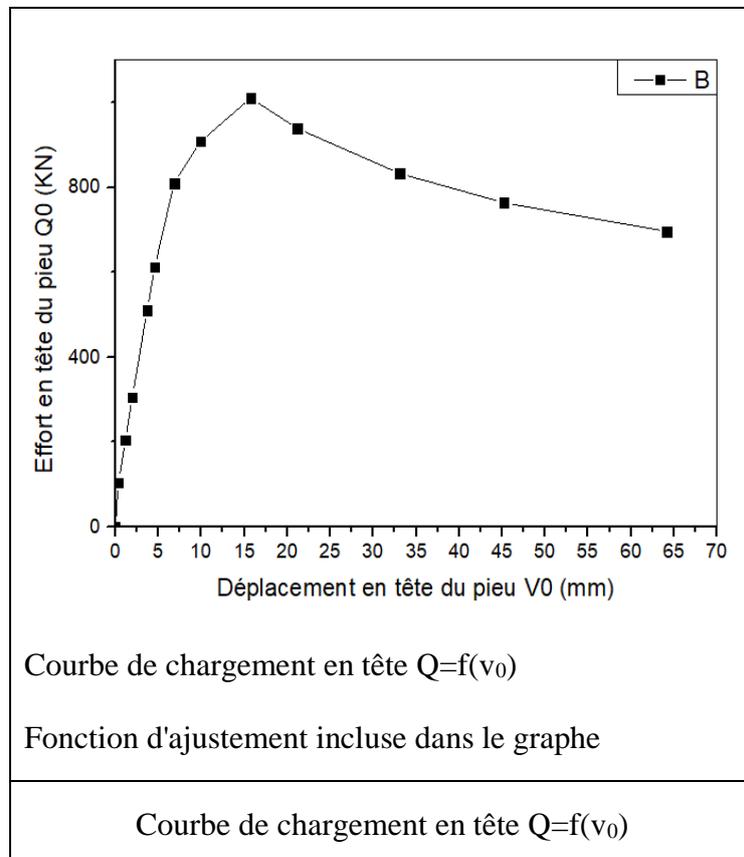
$$K_{v0} = 25.85 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 90.76 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 8.75 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-26	Merville (France)	Pieu battu	Battage	10.20	0.400	210*10 ³	(20)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 851.45 \text{ KPa}$$

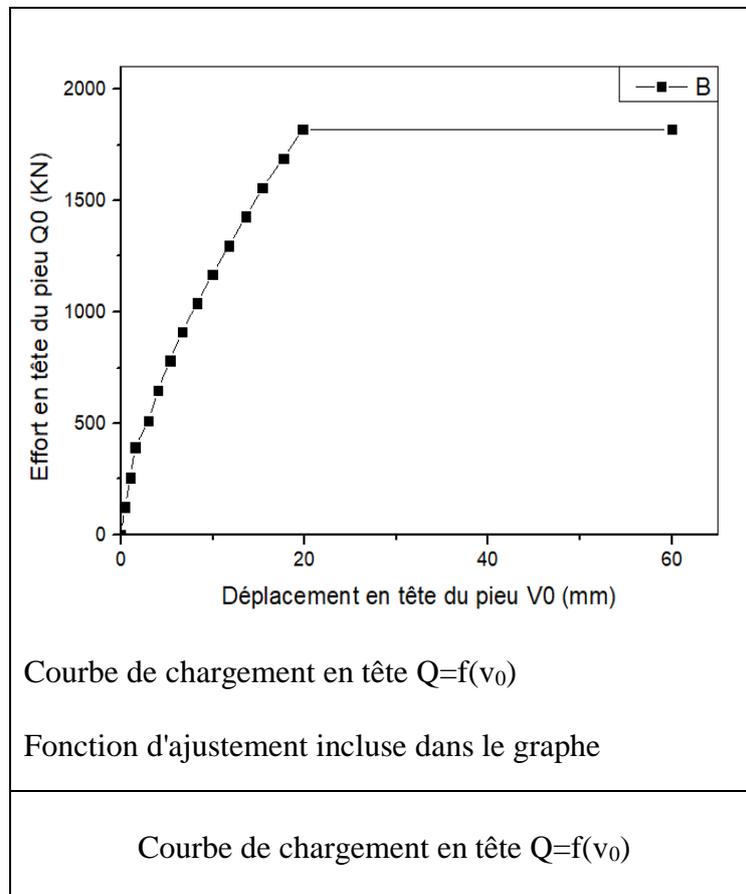
$$K_{v0} = 171.53 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 93.13 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.48 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-27	Göteborg - suède	Pieu battu	Battage	50	0.275	32000	(21)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1819.90 \text{ KPa}$$

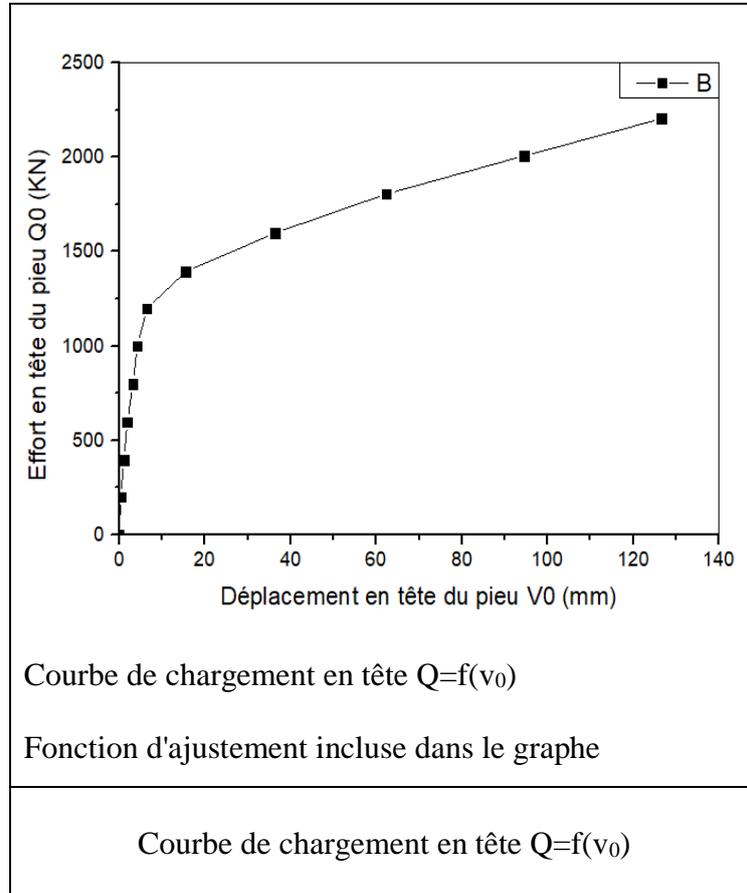
$$K_{v0} = 149.91 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 98.67 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 8.83 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-28	Sideny, BC, Canada	Pieu battu	Battage	25	0.400	32000	(22)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1802.52 \text{ KPa}$$

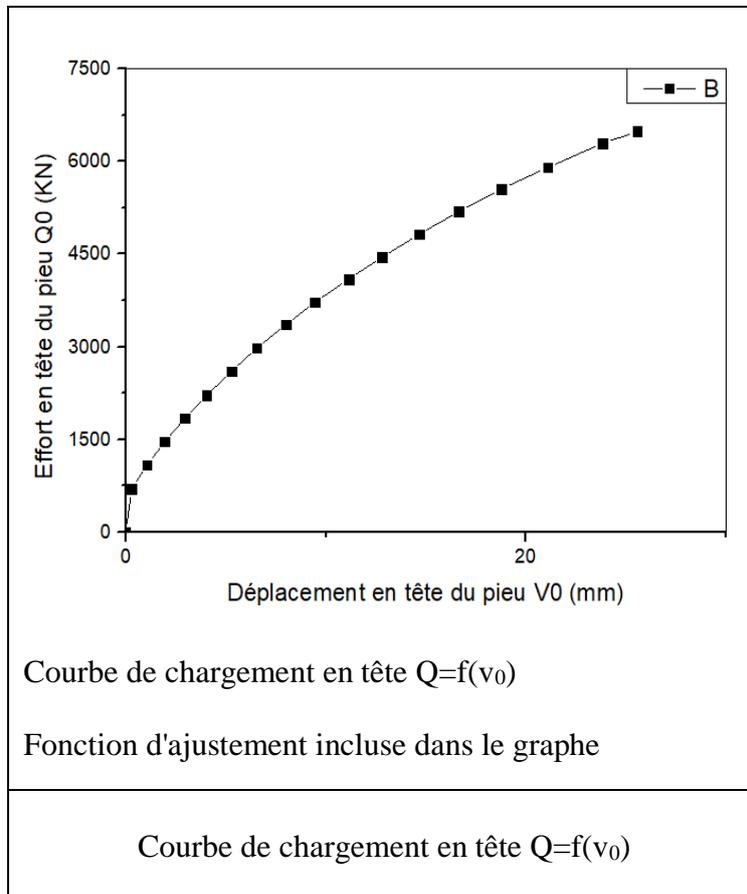
$$K_{v0} = 262.32 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 90.88 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 3.44 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-29-M	Myeongji	Pieu battu	Battage	35	0.600	32000	(23)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 6392.57 \text{ KPa}$$

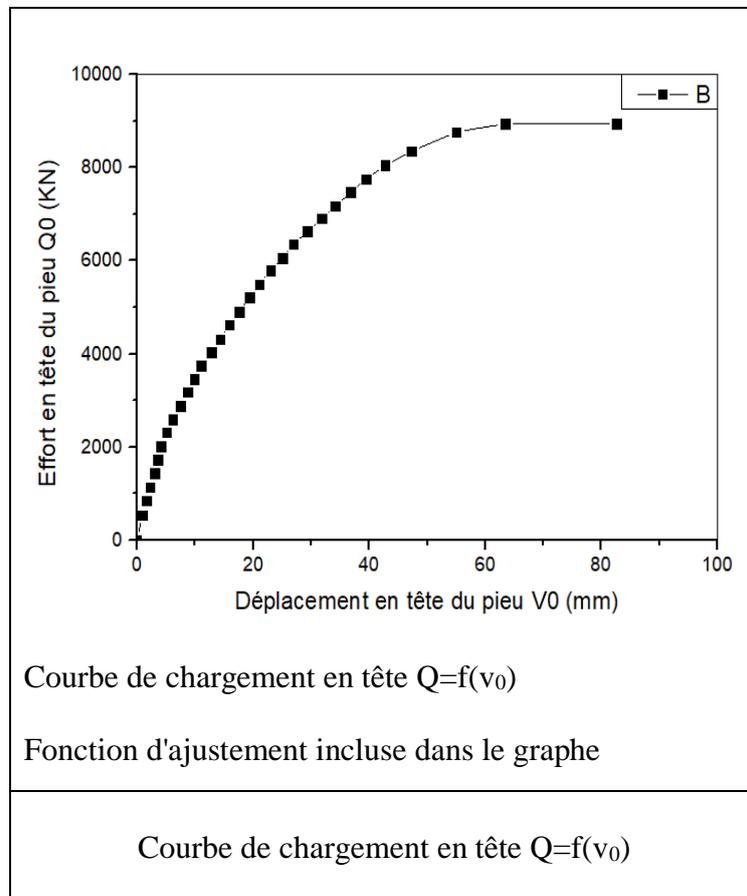
$$K_{v_0} = 459.93 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.30 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v_0} \times B) \times 100 = 4.63 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-29-S	Shinho	Pieu foncé	Fonçage	56	0.600	32000	(23)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 8610.85 \text{ KPa}$$

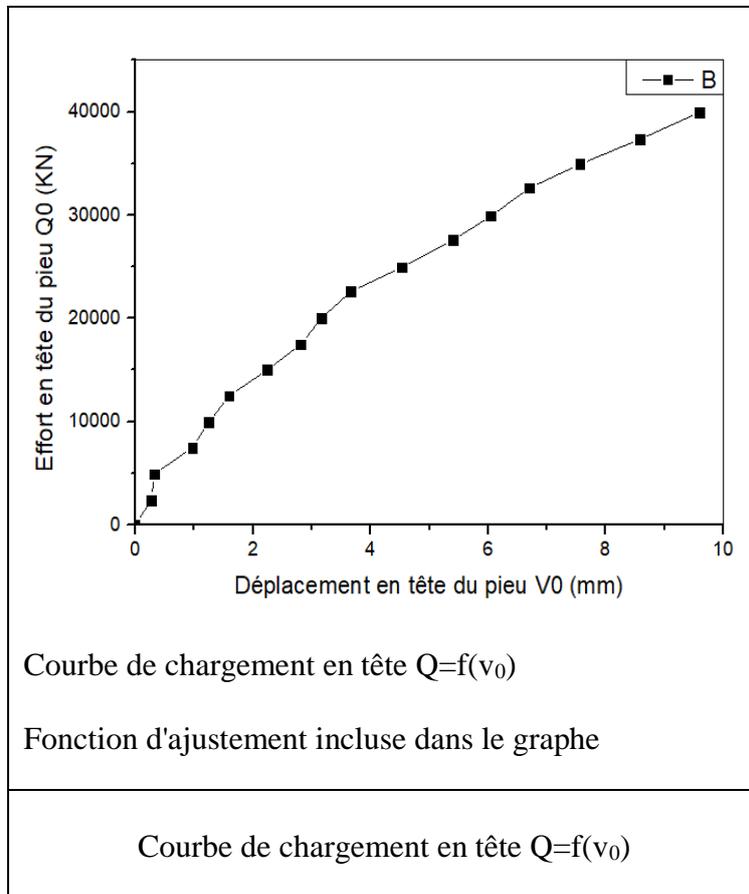
$$K_{v_0} = 323.70 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.98 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v_0} \times B) \times 100 = 8.87 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-30-T1	Takahashi - West Japan	Pieu foré	Forage	70	3	32000	(24)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 39951.85 \text{ KPa}$$

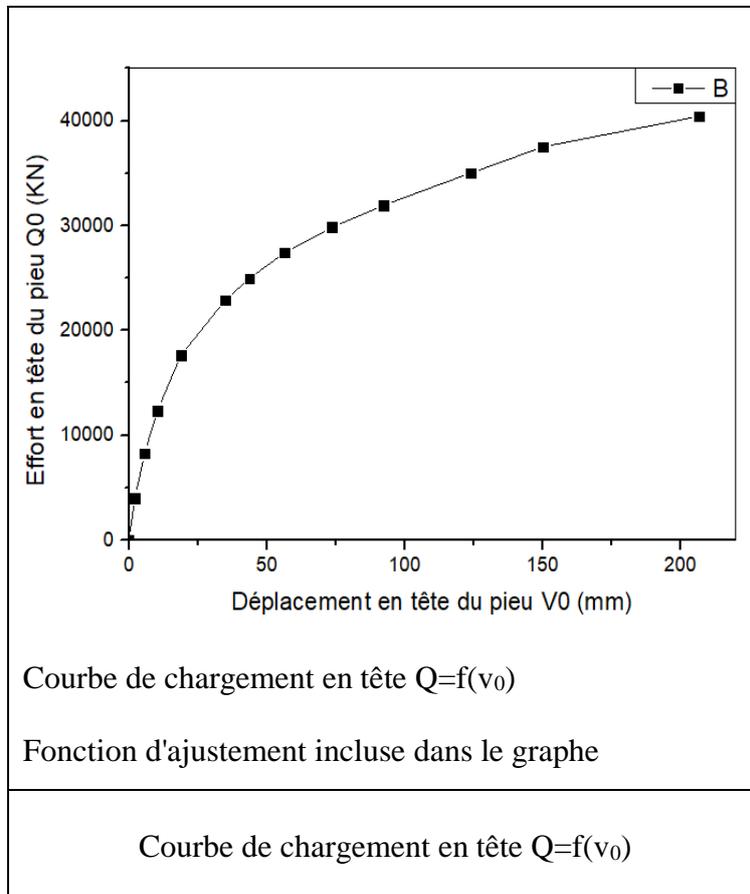
$$K_{v_0} = 6995.46 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 99.11 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v_0} \times B) \times 100 = 0.38 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-30-T2	Takahashi - West Japan	Pieu foré	Forage	40	2	32000	(24)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 36216.52 \text{ KPa}$$

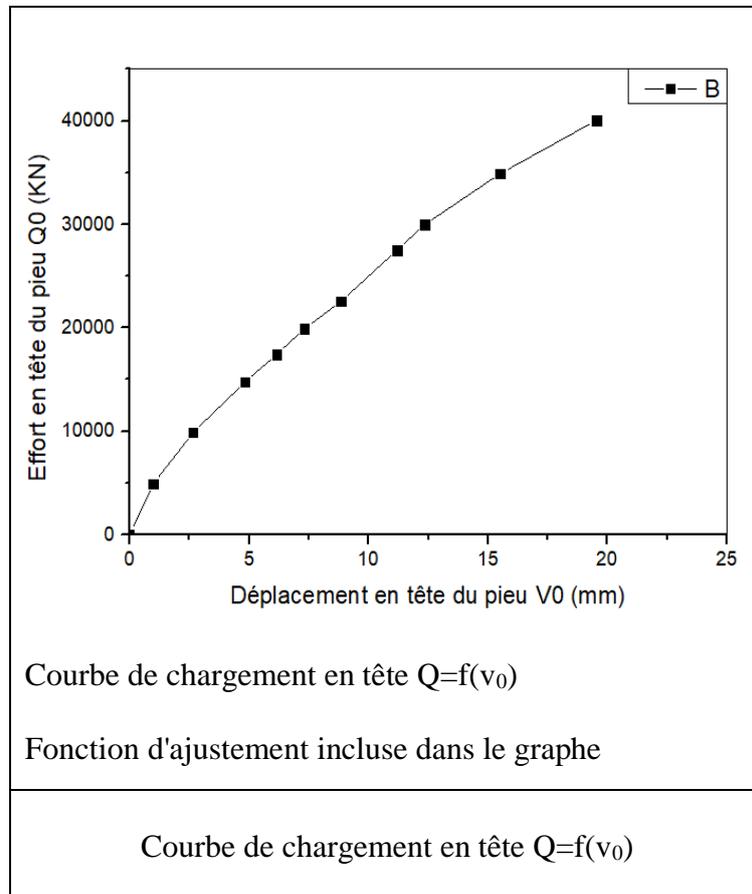
$$K_{v_0} = 675.85 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 93.06 \%$$

$$v_0^{R/B} (\%) = (2Q_l / K_{v_0} \times B) \times 100 = 5.36 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-30-T3	Takahashi - West Japan	Pieu foré	Forage	70	2	32000	(24)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 40067.36 \text{ KPa}$$

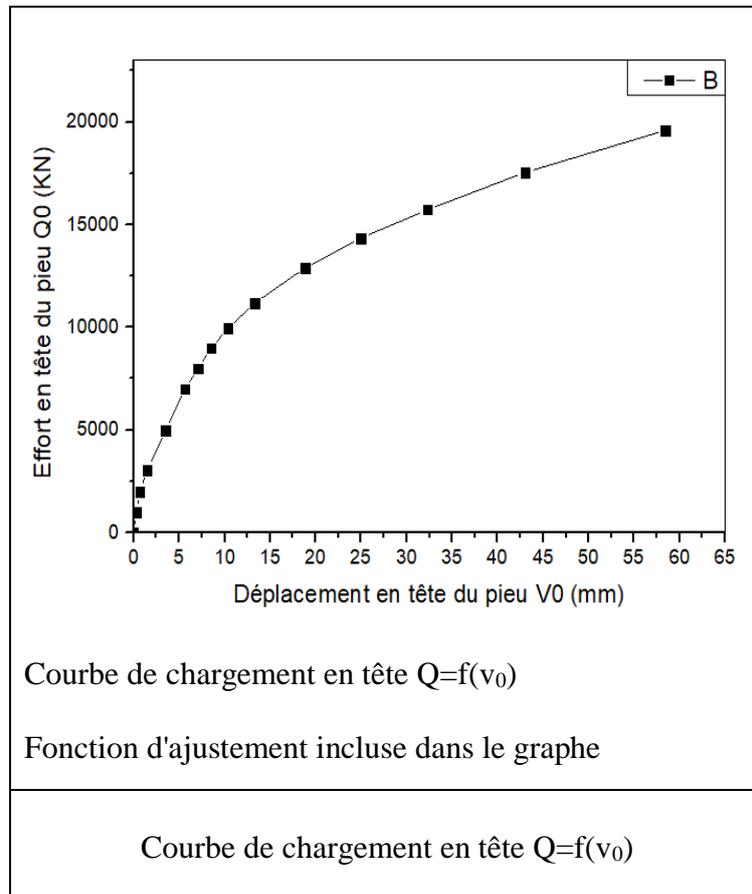
$$K_{v0} = 3267.95 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 99.33 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.23 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-30-T4	Osaka, Japon	Pieu foré	Forage	44	1.5	32000	(24)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 16795.79 \text{ KPa}$$

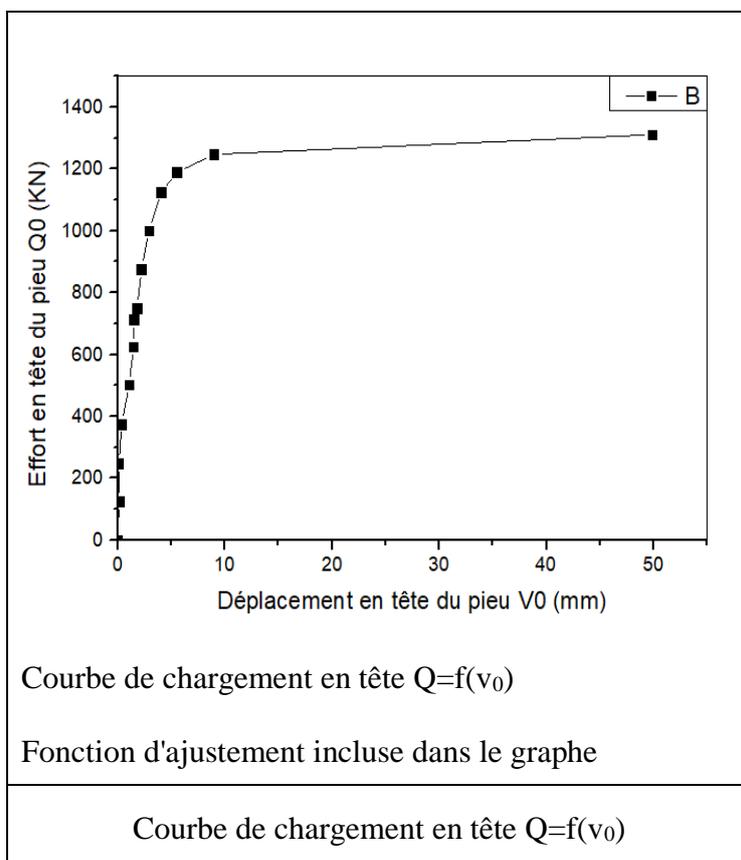
$$K_{v0} = 1106.25 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 95 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.02 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-31	Merville (France)	Pieu foré	Forage	12	0.5	32000	(25)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_I = 1249.38 \text{ KPa}$$

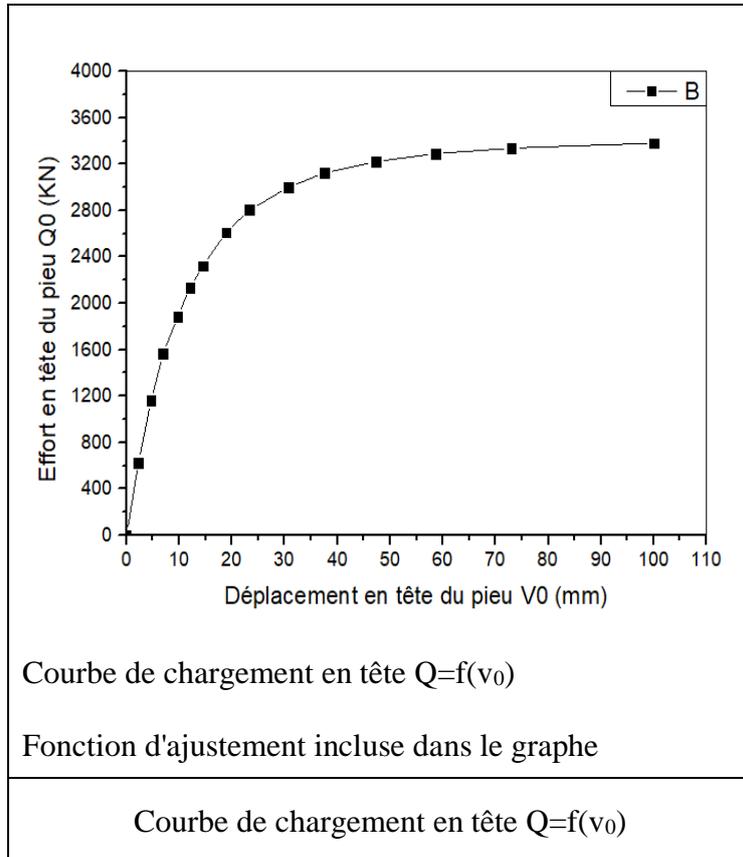
$$K_{v0} = 487.15 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 95.84 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_I/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.02\%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-32	Limelette (Belgique)	Pieu Battu	Battage	9.59	0.39	32000	(26)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 3226.73 \text{ KPa}$$

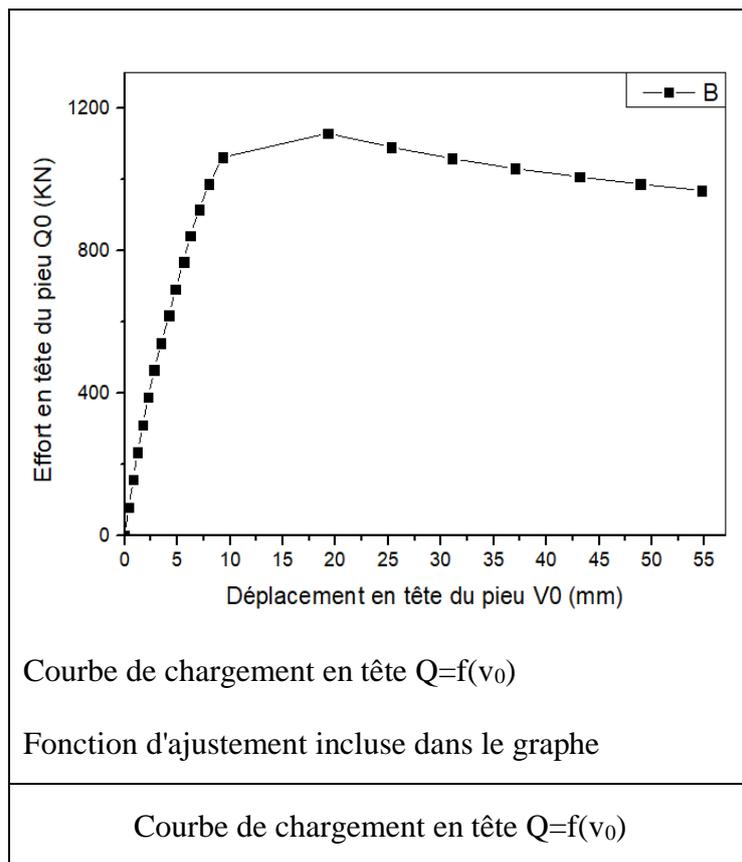
$$K_{v0} = 206.41 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 96.91\%$$

$$v_0^{R/B} (\%) = (2Q_l / K_{v0} \times B) \times 100 = 8.02 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-34	Merville (France)	Pieu battu	Battage	9.4	0.508	210*10 ³	(06)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_t = 1042.38 \text{ KPa}$$

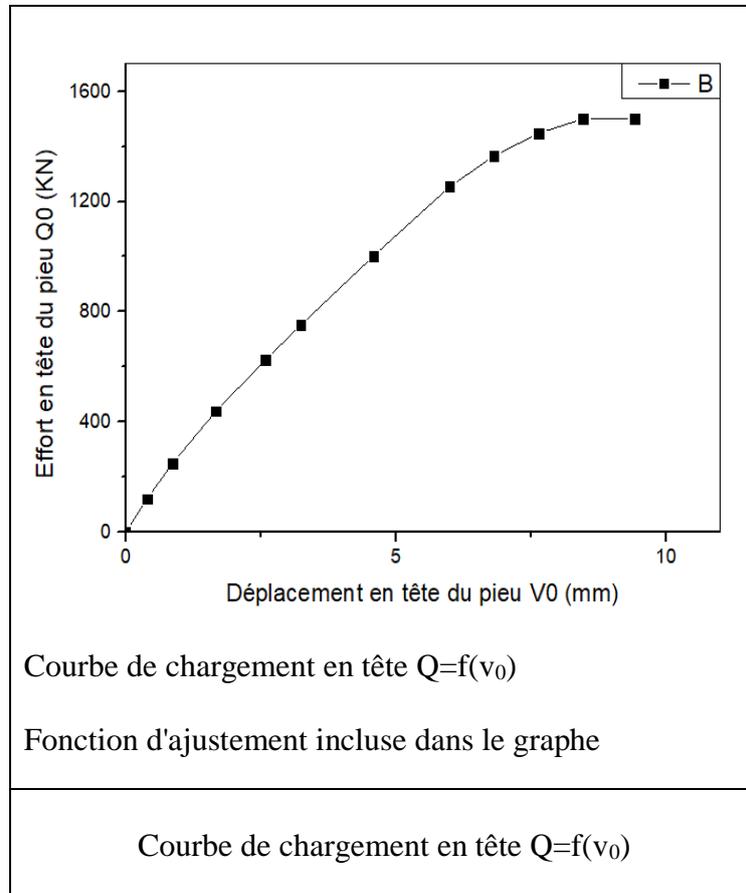
$$K_{v0} = 188.09 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 99.02 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_t/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.18 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-60	Amsterdam, hollande	Pieu battu	Battage	14.05	0.380	32000	(28)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1482.85 \text{ KPa}$$

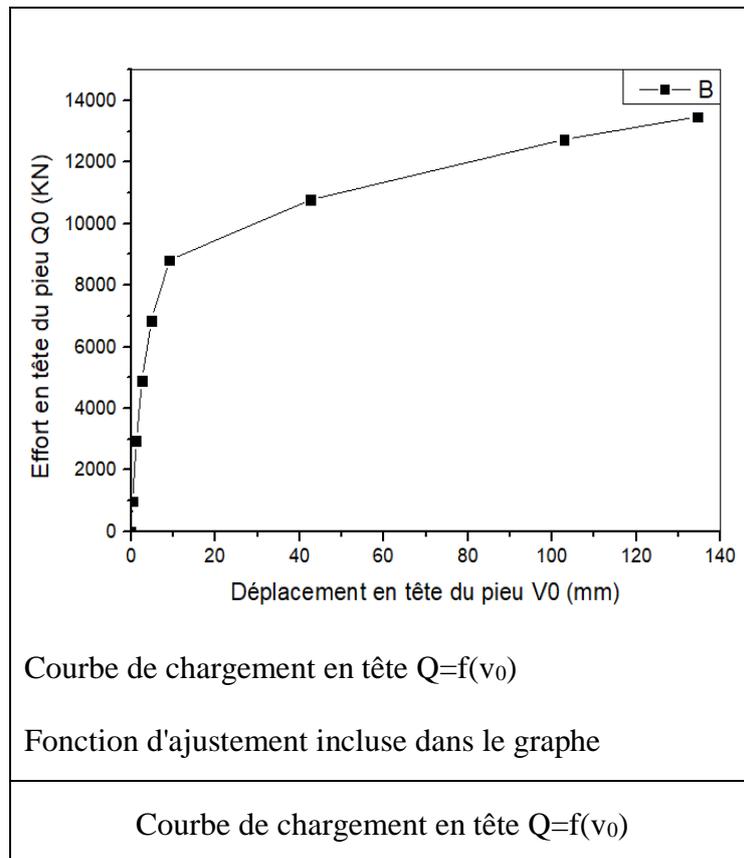
$$K_{v0} = 292.97 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 99.66 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.66 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
B-09	Taipao, Taiwan	Pieu foré	Forage	34.9	1.5	32000	(29)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 12331.67 \text{ KPa}$$

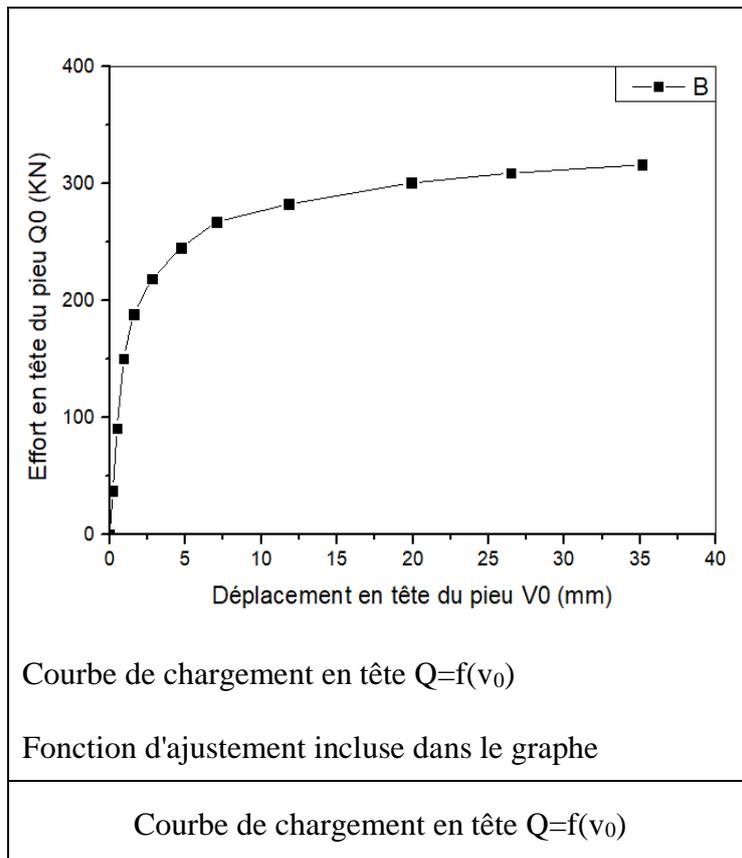
$$K_{v_0} = 1362.42 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 94.47 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v_0} \times B) \times 100 = 1.21 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
P1F-A50	Sao Carlos - Brésil -	Pieu foré	Forage	10.6	0.35	32000	(27)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 268.87 \text{ KPa}$$

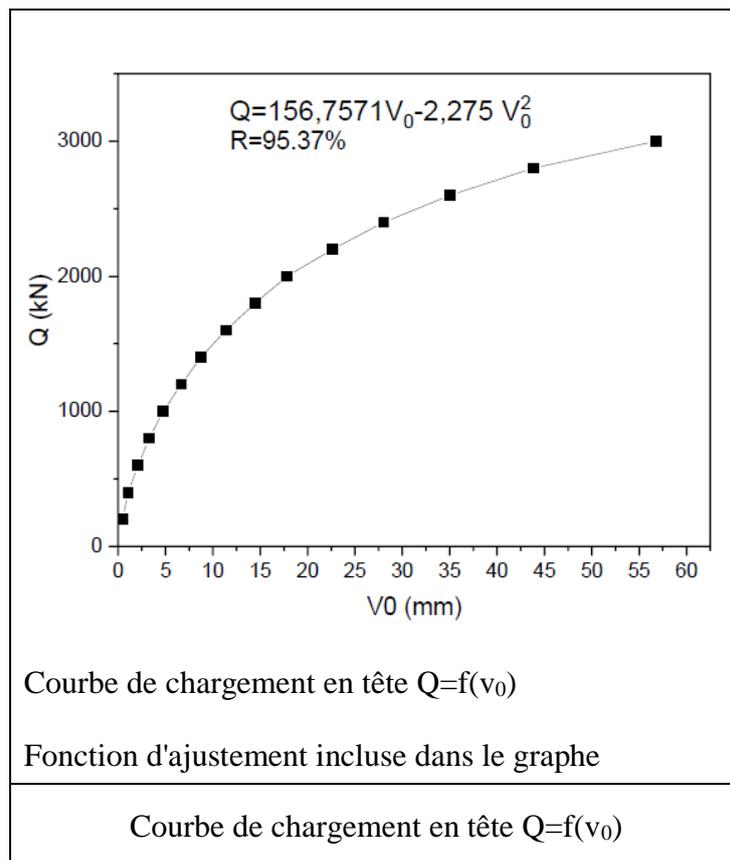
$$K_{v0} = 120.25 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 92.48 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.27 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
P1V-A50	Montivilliers Près du Havre (France)	Pieu vissé Moulé	Vissage	15	0.410	34922,82	(27)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 2700 \text{ KPa}$$

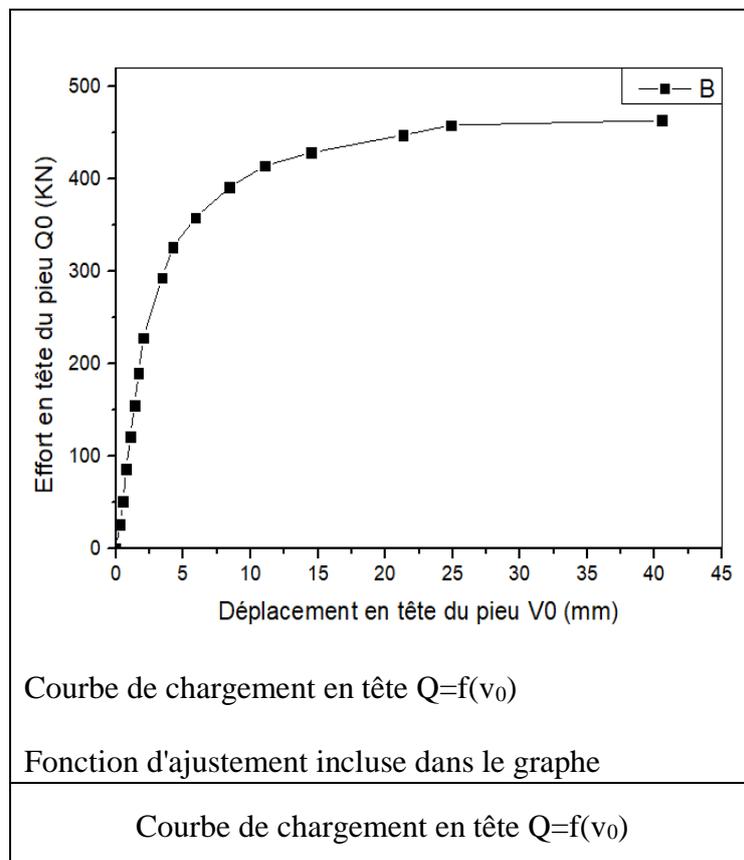
$$K_{v0} = 156.75 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 95,37 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 5,55 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
P2F-A50	Sao Carlos - Brésil -	Pieu foré	Forage	10.6	0.4	32000	(27)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 434.02 \text{ KPa}$$

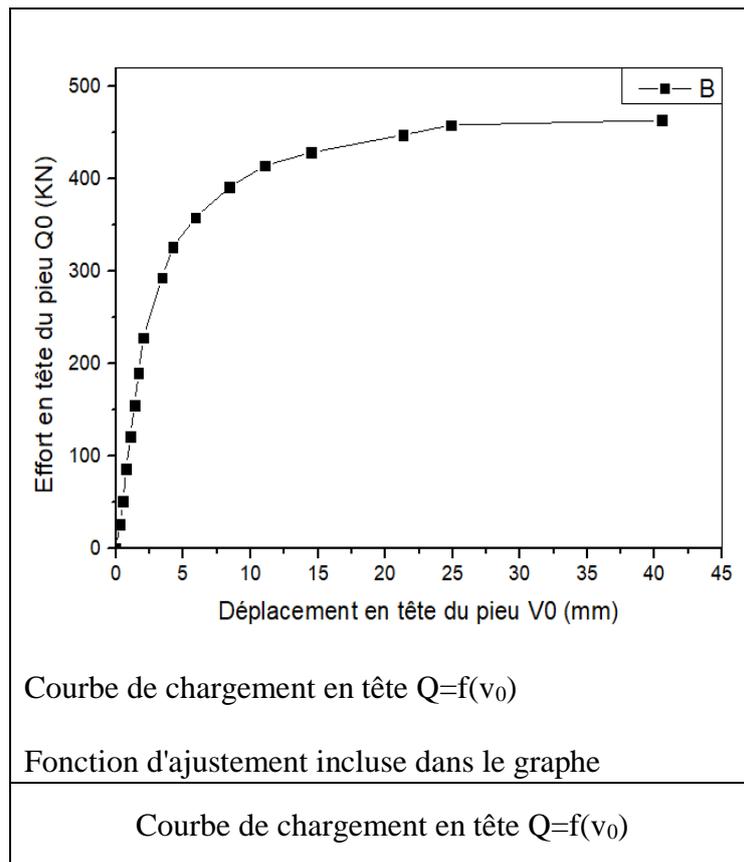
$$K_{v0} = 102.28 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 97.56 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.12 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
P3F-A50	Sao Carlos - Brésil -	Pieu foré	Forage	10.6	0.5	32000	(27)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 388.14 \text{ KPa}$$

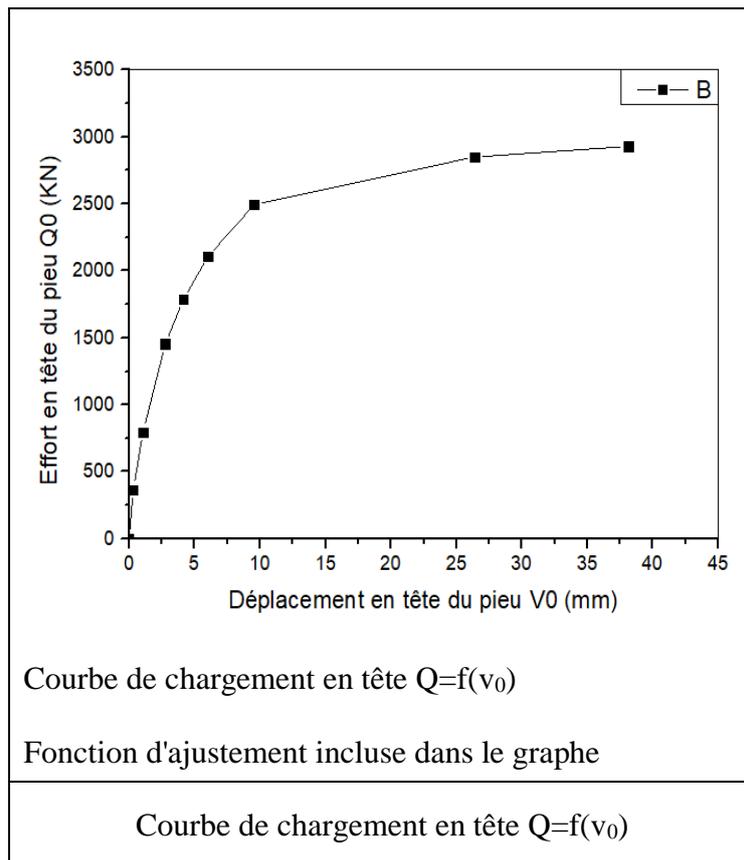
$$K_{v0} = 145.54 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 91.43 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.06 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
P1B-A50	San Francisco - Etats Unis -	Pieu battu	Battage	9.15	0.273	210*10 ³	(27)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 551.34 \text{ KPa}$$

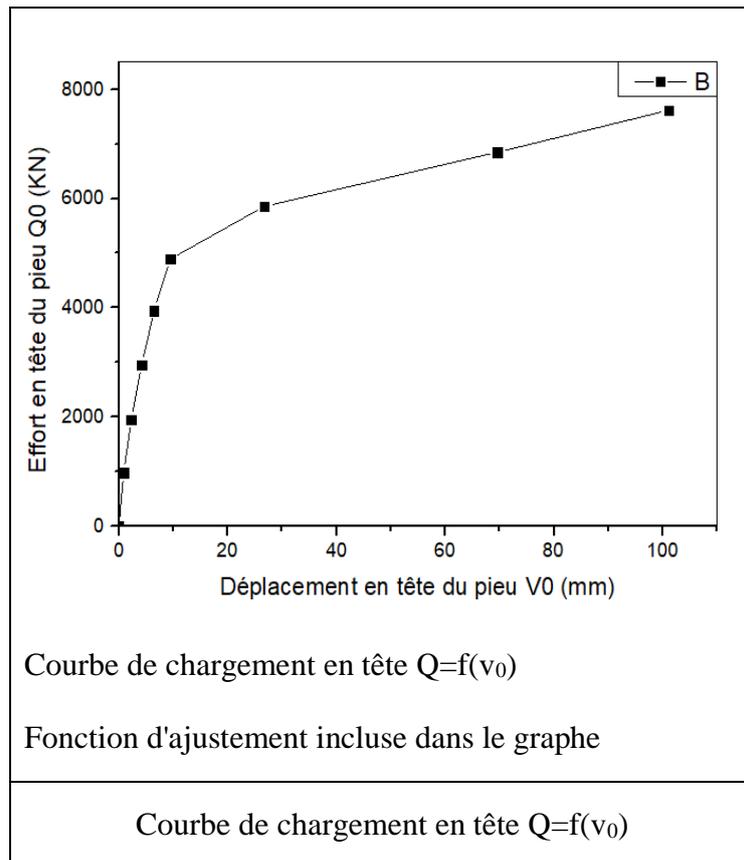
$$K_{v0} = 519.211 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 96.34 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 0.78 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
P-03	Taipao, Taiwan	Pieu battu	Battage	34	0.8	32000	(29)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 6774.33 \text{ KPa}$$

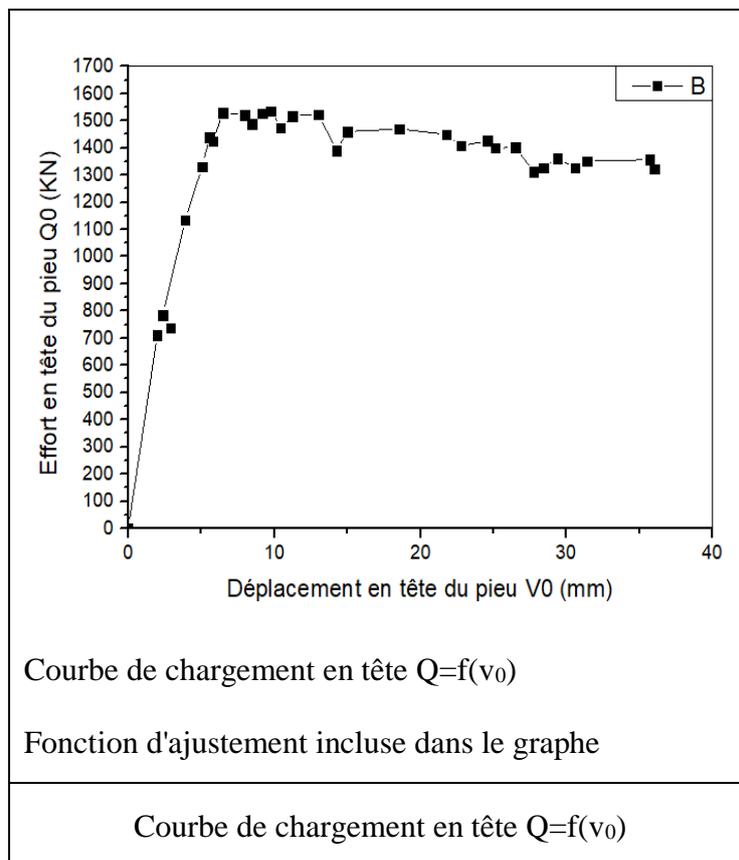
$$K_{v0} = 720.67 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 95.59 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 2.35 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-25-B1	Site d'Argile (Merville)	Pieu battu	Battage	13	0.406	32000	(19)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1429.69$$

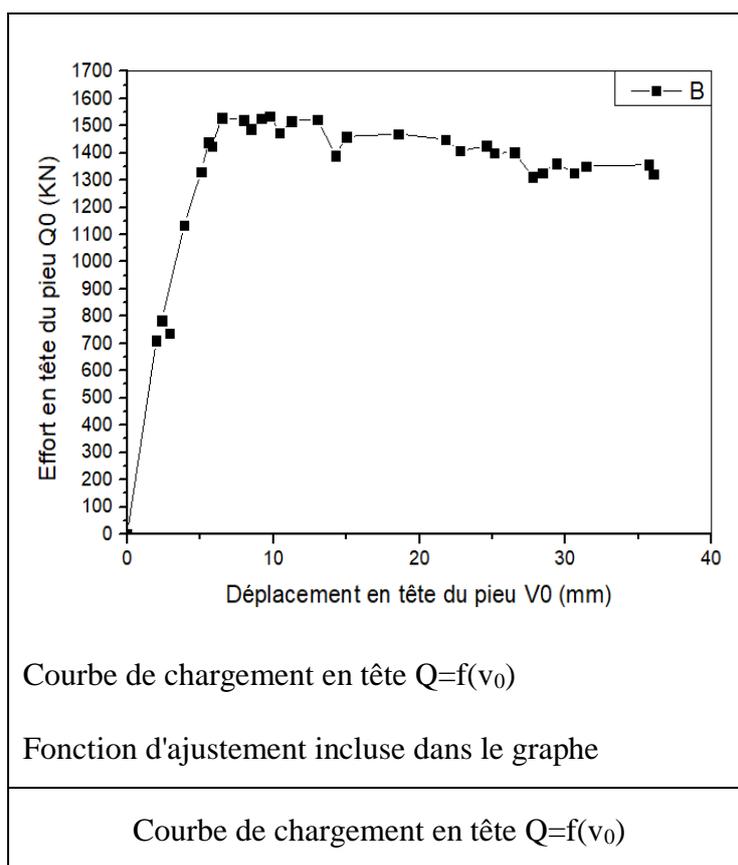
$$K_{v0} = 375.53 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 94.96 \%$$

$$v_0^{R/B} (\%) = (2Q_l / K_{v0} \times B) \times 100 = 1.87 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-25-F1	Site d'Argile (Merville)	Pieu battu	Battage	13	0.406	32000	(19)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1429.69$$

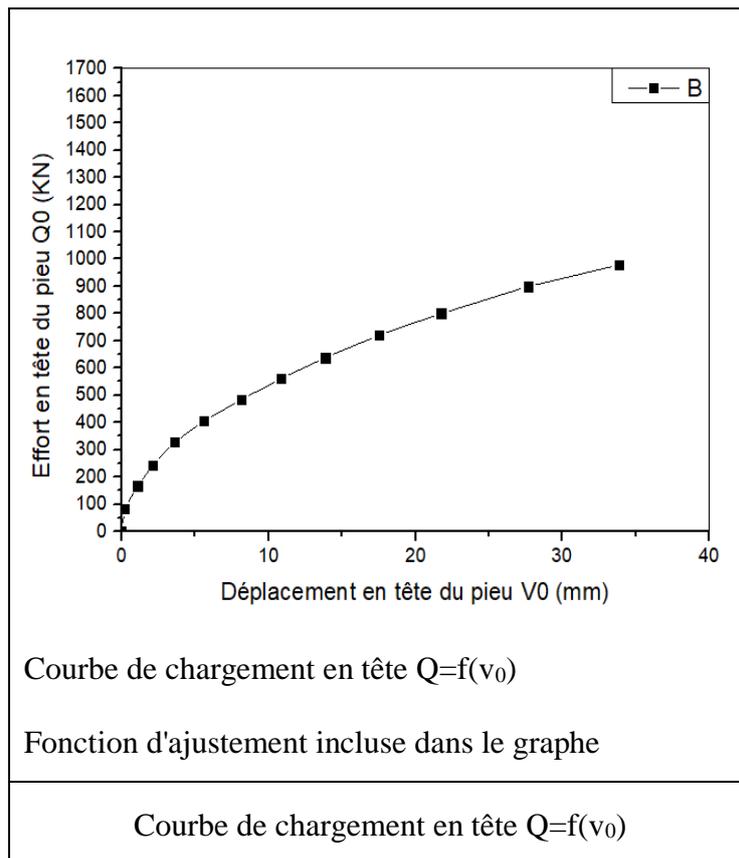
$$K_{v0} = 375.53 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 94.96 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.87 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-25-F4	Site de Sable (Loon-Plage)	Pieu foré	Forage	08	0.420	32000	(19)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 938.84$$

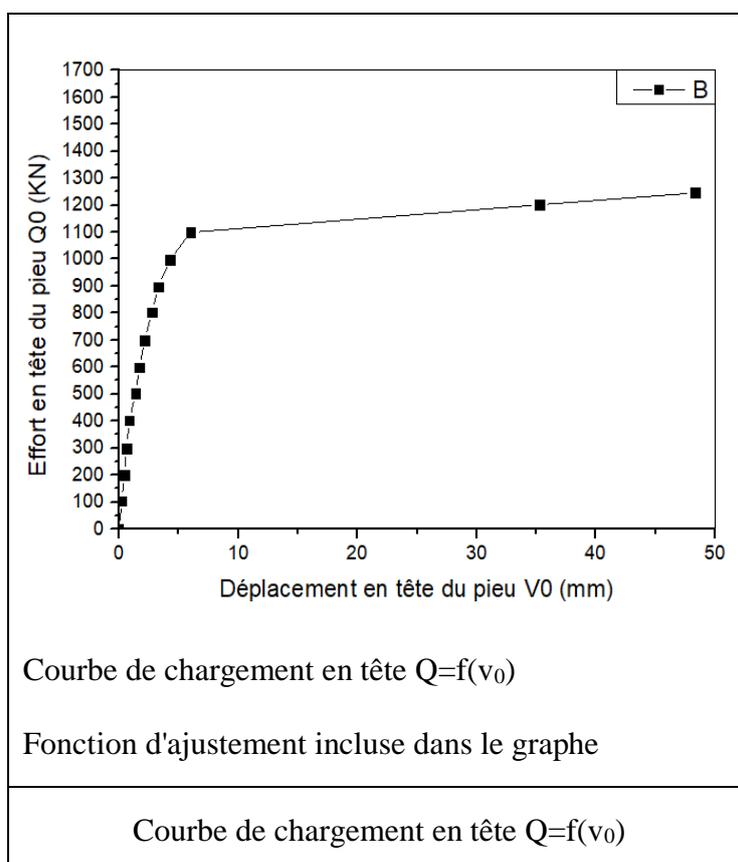
$$K_{v_0} = 58.69 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 95.02 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v_0} \times B) \times 100 = 7.62 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
A-25-S1	Site d'Argile (Merville)	Pieu vissé	Vissage	13	0.420	32000	(19)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 1182.28$$

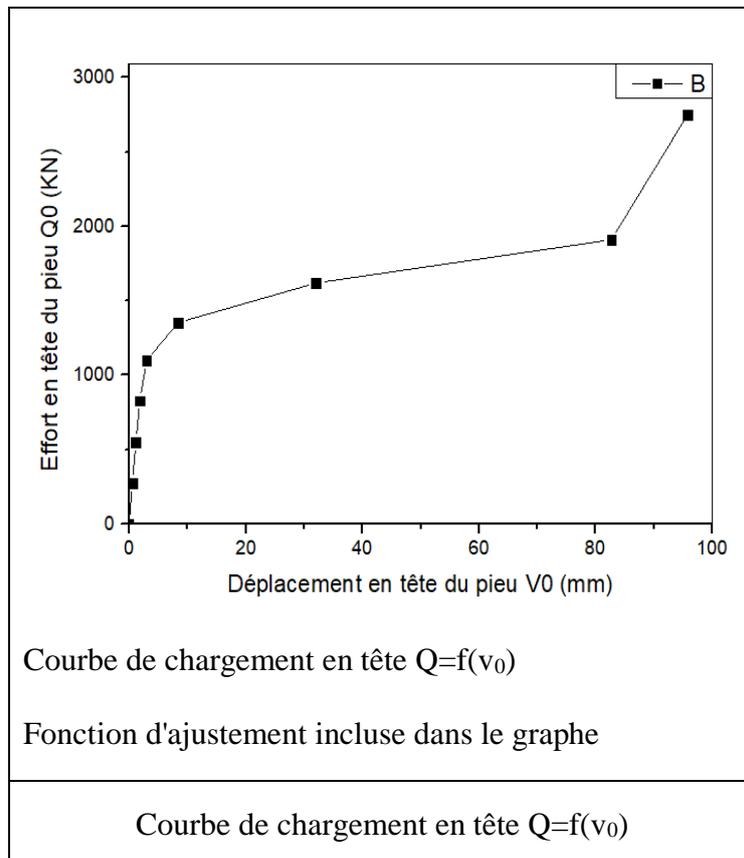
$$K_{v0} = 374.31 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 98.30 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 1.50 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Code	Site	Pieu	Installation	D (m)	B(m)	E _p (MPa)	Remarques
P2B-A50	Merville, France	Pieu Battu	Battage	12.17	0.553	32000	(27)



Paramètres d'ajustement de la courbe de chargement en tête

$$Q_l = 2093.22 \text{ KPa}$$

$$K_{v0} = 202.97 \text{ kN/mm}$$

$$R (\%) = 81.63 \%$$

$$v_0^R/B (\%) = (2Q_l/K_{v0} \times B) \times 100 = 3.87 \%$$

Fonction d'ajustement de la courbe : **PARECT**

Annexe II :

*Les caractéristiques
géométriques de la base des
données d'essais de chargement
latéral des pieux*

Sols sableux

Cas	site	D (m)	B (m)	L (m)	D/B	Matériaux	Mode d'installation
01-146	CHATENAY SUR SEINE (FRANCE)	2.4	0.152	3	15.79	Acier	Fonçage
02-146	CHATENAY SUR SEINE (FRANCE)	0.8	0.051	1	15.69	Acier	Fonçage
14-280	université de techno (FINLANDE)	4	0.273	5	14.65	Acier	Battage
15-517	SOUTH SURRA (KUWAIT)	5	0.3	5	16.67	Béton armé	Forage
18-517	South surra (Kuwait)	3	0.3	3	10.00	Béton armé	Forage
44-638	Shimisu construction company	44.75	1.219	45.15	36.71	Acier	Battage
81-41	port huenene, California(1954)	12.192	0.406	12.19	30.03	Acier	Battage
82-41	/	2.438	0.051	/	47.80	Acier	Battage
83-41	Padre Island (Texas),1964	19.202	0.508	19.20	37.80	Acier	Battage/Fonçage
84-41	Romania	9.55	0.35	9.70	27.29	Béton	Battage
85-41	Locks and dam26	15.85	0.36	16.10	44.03	Acier	Battage
99-283	Bailly	17.08	0.356	17.54	47.98	Béton	Battage
100-283	Bailly	17.07	0.356	17.54	47.95	Béton	Battage
101-283	Hydraulic fill	5.486	0.121	6	45.34	Acier	Battage
102-283	Hydraulic fill	7.315	0.219	7.83	33.40	Acier	Battage
103-283	Hydraulic fill	9.15	0.406	9.66	22.54	Acier	Battage
104-283	Hydraulic fill	9.15	0.406	9.66	22.54	Acier	Battage
105-283	University de Texas	2.44	0.051	2.64	47.84	Acier	Battage
106-283	Arkansas river(1970)	16.15	0.406	16.18	39.78	Acier	Battage

107-283	Arkansas river(1970)	16.15	0.406	16.15	39.78	Acier	Jetted
108-283	Arkansas river(1970)	15.54	0.41	/	37.90	Béton précontraint	Battage
109-283	Arkansas river(1970)	15.54	0.41	/	37.90	Béton précontraint	Jetted
110-283	Arkansas river(1970)	12.2	0.36	/	33.89	Béton	Battage
111-283	Arkansas river(1970)	13.72	0.356	13.87	38.54	/	Battage
114-1315	Eastern Missouri	19.825	0.406	/	48.83	Acier remplie Béton	Battage
115-1315	Eastern Missouri	18.3	0.406	19.81	45.07	Béton	Battage
116-1315	Eastern Missouri	18.3	0.416	/	43.99	Béton	Forage
117-1315	Eastern Missouri	18.29	0.406	18.29	45.05	Béton	Battage
130-41	Arkansas River. Arkansas	16.17	0.41	16.2	39.44	Acier	Battage
131-41	Arkansas River. Arkansas	16.17	0.41	16.2	39.44	Acier	Battage
161-146	CHATENAY SUR SEINE (FRANCE)	1.6	0.102	2	15.69	Acier	Fonçage
162-74	Le Rheu ,FRANCE	5	0.5	7	10.00	Acier remplie coulis	Forage
168-283	Arkansas River	11.895	0.356	12.2	33.41	/	Battage

Sols argileux

Cas	site	D (m)	B (m)	L (m)	D/B	Matériaux	Mode d'installation
08-578	ROMAINVILLE (FRANCE)	4.9	0.43	6.29	11.40	Acier	Fonçage
10-562	ROMAINVILLE (FRANCE)	4.65	0.43	7	10.81	Acier	Fonçage
17-428	HOUSTON (USA)	13.11	0.273	13.82	48.02	Acier	Battage
24-403	/	15.24	0.305	15.24	49.97	bois	Battage
26-414	/	11.156	0.317	11.15	35.19	Bois	Battage
29-403	/	22.86	0.61	/	37.48	Acier	Battage
34-851	San Francisco (USA)-bay mud	5.55	0.114	/	48.68	Acier	Battage
35-851	San Francisco (USA)-bay mud	6.22	0.219	/	28.40	Acier	Battage
36-851	San Francisco (USA)-bay mud	5.09	0.324	/	15.71	Acier	Battage
37-851	San Francisco (USA)-bay mud	8.14	0.406	/	20.05	Acier	Battage
48-850	London, Brent cross site	16.5	0.406	17.5	40.64	Acier	Forage
62-673	TEXAS (USA)	8.84	0.168	13.12	52.62	Acier	Battage
71-673	TEXAS (USA)	14.93	0.61	18.29	24.48	Acier	Battage
86-283	Bagolet(FRANCE)	5.09	0.432	6.096	11.78	Acier	Vérinage
89-283	bay Mud	5.55	0.121	6.06	45.87	Acier	Battage
90-283	bay Mud	6.22	0.219	6.73	28.40	Acier	Battage
91-283	bay Mud	5.09	0.324	5.6	15.71	Acier	Battage
92-283	bay Mud	8.14	0.406	8.65	20.05	Acier	Battage
94-283	bay Mud	6.22	0.219	6.73	28.40	Acier	Battage
95-283	bay Mud	5.09	0.32	5.6	15.91	Acier	Battage
96-283	bay Mud	8.14	0.406	8.64	20.05	Acier	Battage
98-283	St Gabriel,Louisiana,USA	35.075	0.254	35.8	138.09	Béton	Battage
118-512	Carfou(1a),Grèce	10	0.52	/	19.23	/	Battage
119-512	Carfou(1a),Grèce	10	0.52	/	19.23	/	Battage

120-512	Athéne	32	1.25	/	25.60	/	Forage
121-516	Carfou(1a),Grèce	10	0.52	/	19.23	Béton	Forage
122-516	Carfou(1a),Grèce	10	0.52	/	19.23	Béton	Forage
123-516	Carfou(1a),Grèce	10	0.52	/	19.23	Béton	Forage
124-516	Carfou(1a),Grèce	10	0.52	/	19.23	Béton	Forage
125-516	Carfou(1a),Grèce	10	0.52	/	19.23	Béton	Forage
126-516	Carfou(1a),Grèce	10	0.52	/	19.23	Béton	Forage
128-611	Harvey,louisiana,USA	12.19	0.152	/	80.20	Acier	Battage
140-283	Arkansas River. Arkansas	5.18	0.305	/	16.98	/	Vérinage
142-85	Sabine	12.2	0.324	/	37.65	/	Battage
155-633	/	11.8	0.273	/	43.22	Acier	Battage
158-864	/	22.39	1.5	32.49	14.93	Acier	Battage
159-864	/	40	2	46.78	20.00	Acier	Battage
160-864	/	30	1.548	30.5	19.38	Béton	Battage

Sols multicouches

Cas	site	D (m)	B (m)	L (m)	D/B	Matériaux	Mode d'installation
03-192	Plancoët (FRANCE)	6.1	0.28	8	21.79	Acier	Fonçage
12-382	GUADIANA (PORTUGUAL)	40	2	40	20.00	Béton	Forage
13-365	DELFT (PAYS BAS)/thèse 967	10.5	0.601	12.5	17.47	Acier	Fonçage
16-359	SOUTH SURRA (KUWAIT)	34.2	1	36	34.20	Béton	Forage
19-399	Vancouver (CANADA)	16.8	0.324	16.8	51.85	Acier	Battage
20-399	Vancouver (CANADA)	31.1	0.324	31.1	95.99	Acier	Battage
21-399	Vancouver (CANADA)	94	0.914	94	102.84	Acier	Battage
23-429	Houston (USA)	3.35	0.273	4.22	12.27	Acier	Battage
38-624	CALGARY (CANADA)	15	1.5	15	10.00	Béton armé	Forage
39-624	CALGARY (CANADA)	15	0.9	15	16.67	Béton armé	Forage
40-624	CALGARY (CANADA)	15	1.2	15	12.50	Béton armé	Forage
41-753	rivière de DANUBE (ROUMANIE)	16	0.4	17	40.00	Béton armé	Battage
42-753	rivière de DANUBE (ROUMANIE)	16	0.4	17	40.00	Béton armé	Battage
43-638	Shiki (Saitama)	17.5	0.609	18.82	28.74	Acier	Battage
45-638	Shiki (Saitama)	17.5	0.6	18.82	29.17	Béton précontraint	Forage
46-638	Ichikawa (Chiba) JAPAN	34.75	0.591	37.18	58.80	Béton	Forage
59-767	BEDOK (SINGAPORE)	30.5	1	30.5	30.50	Béton armé	Forage
60-767	BEDOK (SINGAPORE)	26.4	1	26.4	26.40	Béton armé	Forage
61-767	BEDOK (SINGAPORE)	18	1	18	18.00	Béton armé	Forage

63-340	Néo Faliro (Grèce)	21.5	0.102	21.5	210.78	Acier	Forage
64-340	Néo Faliro (Grèce)	21.5	0.102	21.5	210.78	Acier	Forage
65-340	Néo Faliro (Grèce)/1978	15	0.102	15	147.06	Acier	Forage
66-340	Néo Faliro (Grèce)	15	0.102	15	147.06	Acier	Forage
67-879	Lausanne (SUISSE)	18.5	0.82	19.31	22.56	Béton	Forage
68-876	HOUSTON (USA)	12.8	0.762	13.4	16.80	Béton armé	Forage
69-756	ROMANIA	38	1.27	38.85	29.92	Béton armé	Forage
70-756	DANUBE (ROMANIA)	14	0.88	15.2	15.91	Béton armé	Forage
78-631	CUBZAC-DES PONTS (FRANCE)	25.25	0.92	26.75	27.45	Acier	Fonçage
80-931	Delft (Pays Bas)	10.5	0.601	12.5	17.47	Acier	Battage
112-755	Eastern tip of lulu Island	94	0.915	/	102.73	Acier	Battage
127-573	Plancoët(cote du nord- France)	6.5	0.284	7	22.89	Acier	Battage
129-41	Mustang Island, TEXAS	21.05	0.609	24.4	34.56	Acier	Battage
134-283	Savannah River_augusta_GEORGIA	11.285	0.229	11.285	49.28	bois	Battage
135-755	Eastern tip of lulu Island	16.8	0.324	/	51.85	Acier	Battage
136-755	Eastern tip of lulu Island	31.1	0.324	/	95.99	Acier	Battage
137-1261	Roosevelt bridges	14	0.76	16.5	18.42	Béton précontraint	Battage
138-512	kallithea	10	0.55	/	18.18	/	Battage
139-512	Axios, Grèce	35.6	1	/	35.60	/	Forage
143-614	université de Texas	4.9	0.152	/	32.24	Acier	Battage
148-851	El Centro	3.66	0.114	/	32.11	Acier	Battage
149-851	El Centro	5.18	0.219	/	23.65	Acier	Battage

150-851	El Centro	6.71	0.324	/	20.71	Acier	Battage
151-851	El Centro	8.23	0.406	/	20.27	Acier	Battage
152-756	ROMANIA	10	1	/	10.00	Béton armé	Forage
153-756	ROMANIA	33	0.88	/	37.50	Béton armé	Forage
154-631	CUBZAC-DES PONTS (FRANCE)	25	0.92	26.75	27.17	Acier	Fonçage
157-2000	Belfast estuary	9.5	0.35	/	27.14	Béton précontraint	Battage
166-1317	Japon Site A	46.86	1.5	47	31.24	Acier	Battage
167-1317	Japon Site A	46.5	1.5	47	31.00	Béton armé	Forage
169-1	JIJEL-ALGERIE	22.7	1	/	22.70	Béton armé	Forage

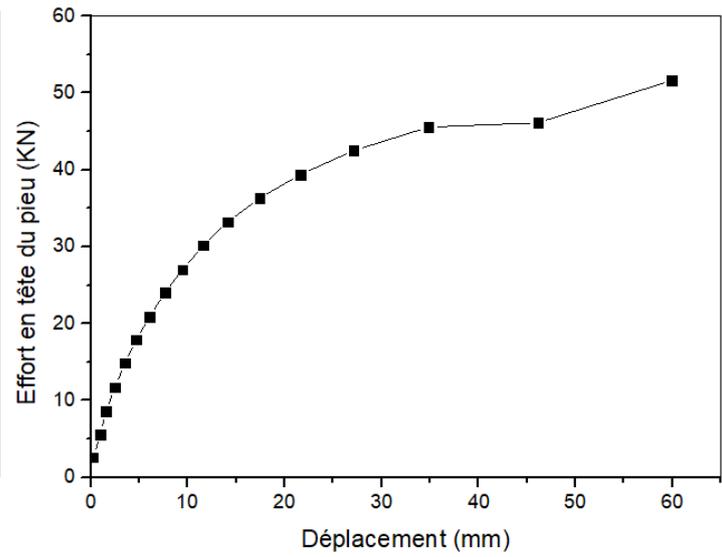
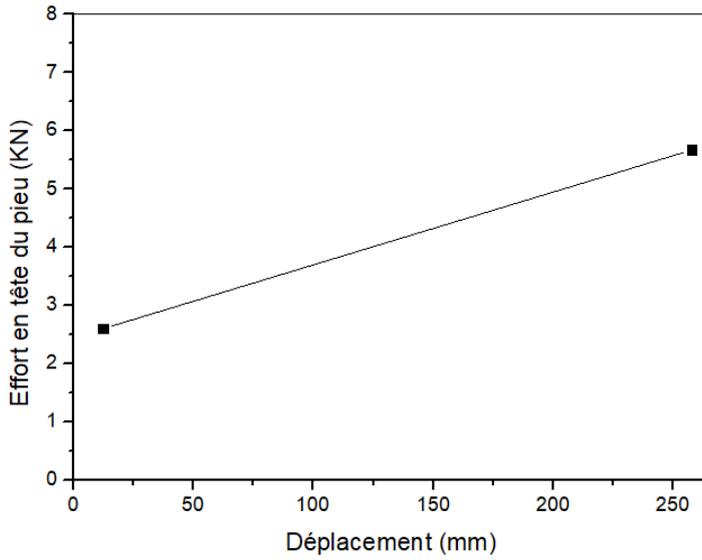
Sols limoneux

Cas	site	D (m)	B (m)	L (m)	D/B	Matériaux	Mode d'installation
28-403	/	16.55	0.356	26.46	46.49	Acier	Battage
132-283	Hudson river	16.47	0.356	26.38	46.26	Acier	Battage

Annexe III :

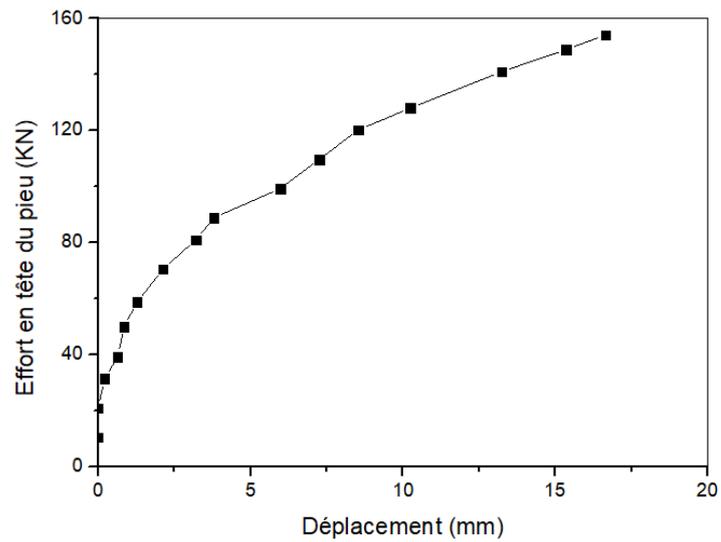
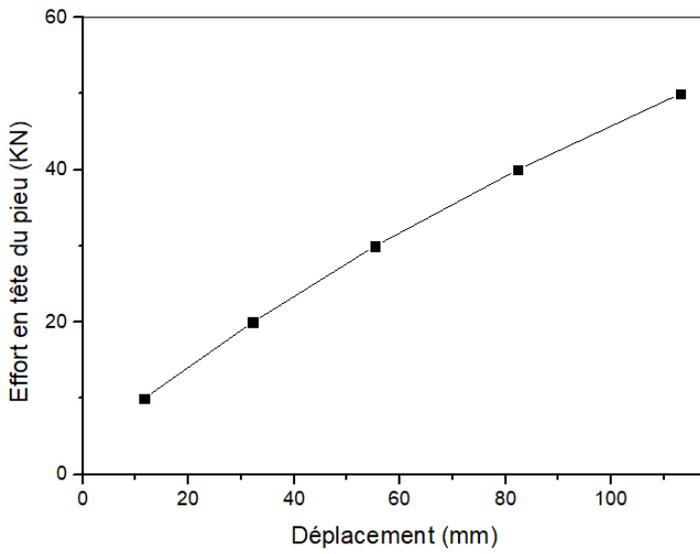
*Les courbes de chargement
latéral*

Sols sableux



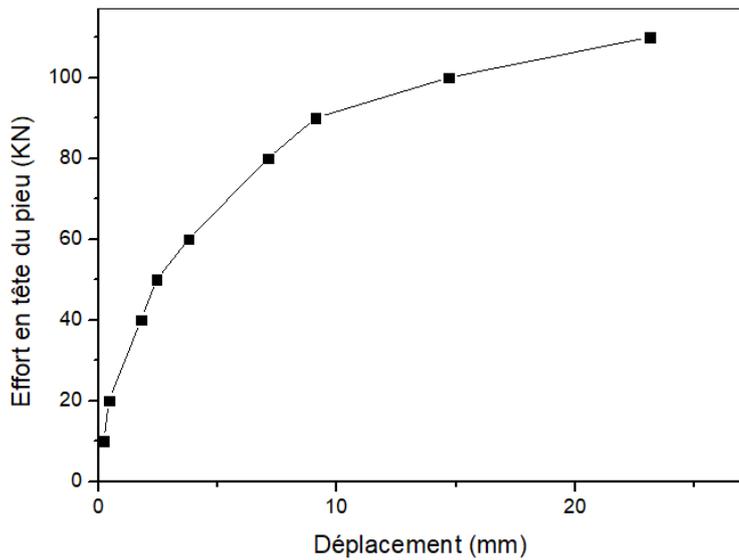
Courbe de chargement cas n° : 01-146

Courbe de chargement cas n° : 02-146

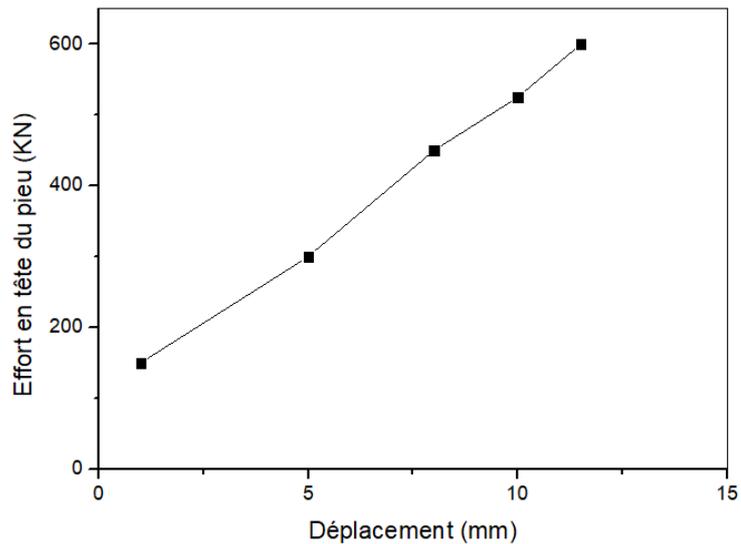


Courbe de chargement cas n° : 14-280

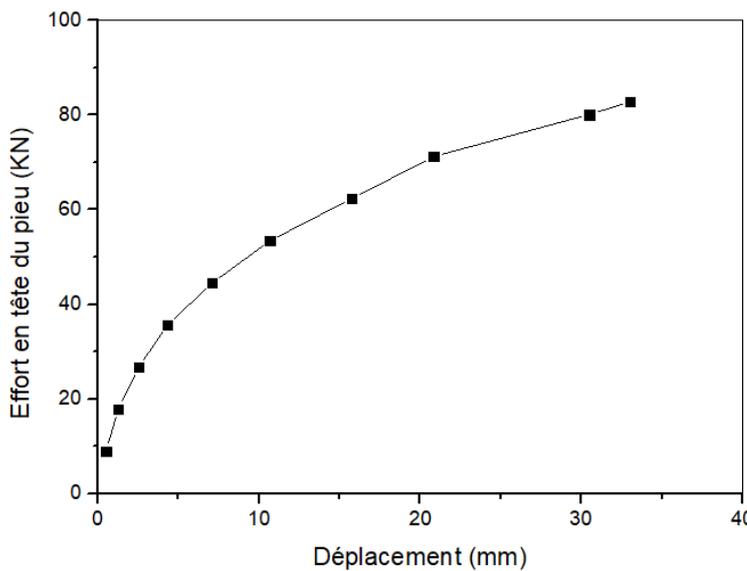
Courbe de chargement cas n° : 15-517



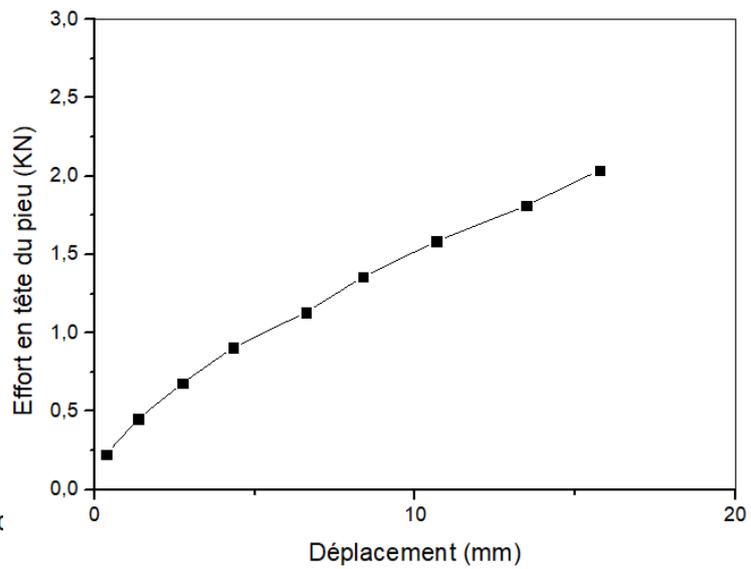
Courbe de chargement cas n° : 18-517



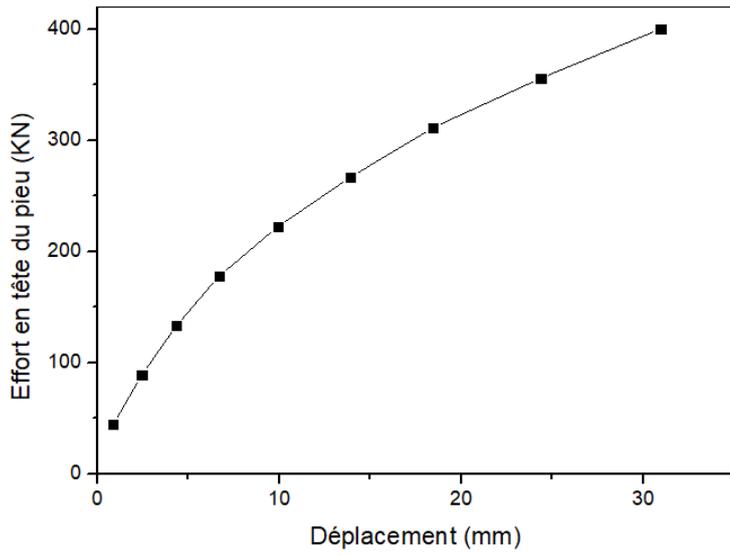
Courbe de chargement cas n° : 44-638



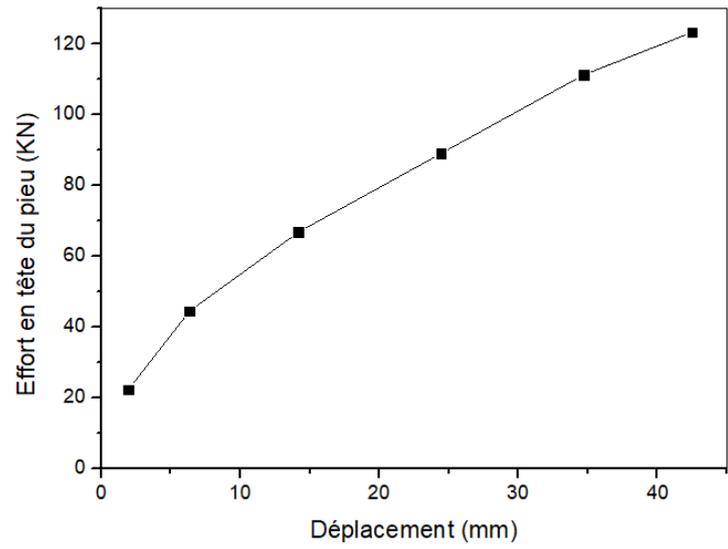
Courbe de chargement cas n° : 81-41



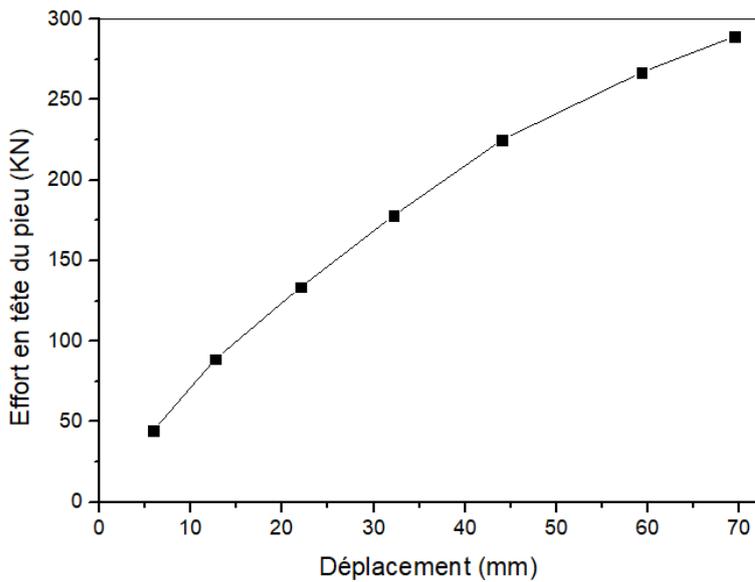
Courbe de chargement cas n° : 82-41



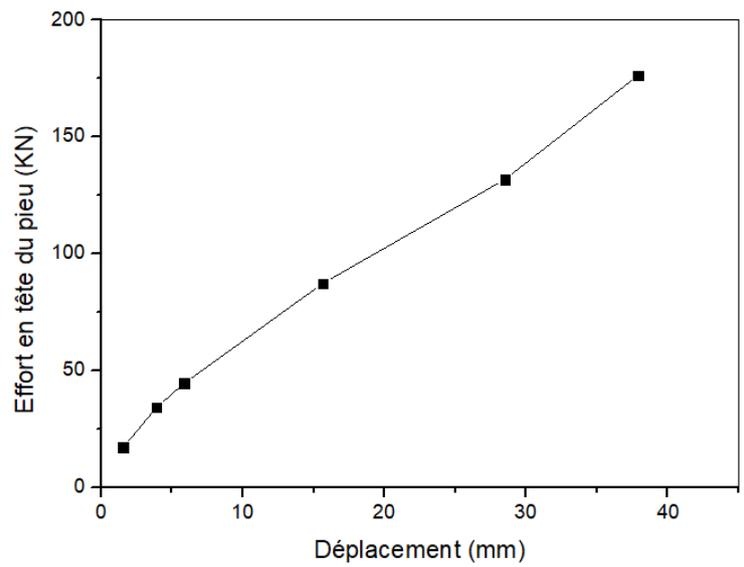
Courbe de chargement cas n° : 83-41



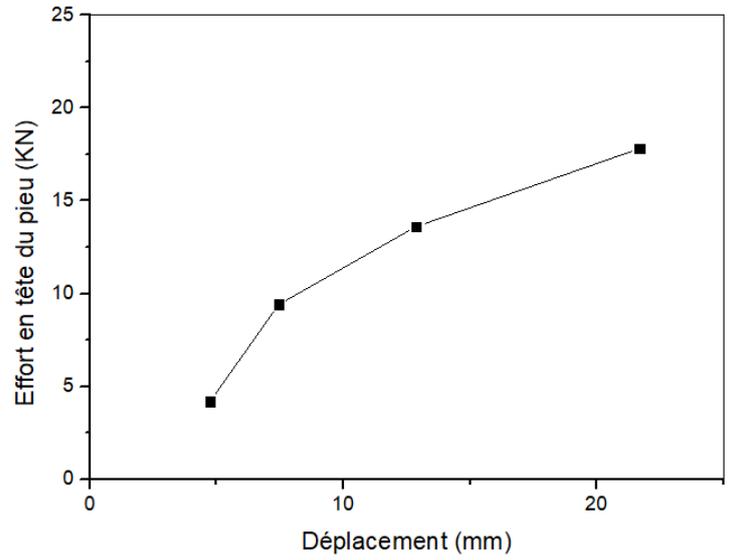
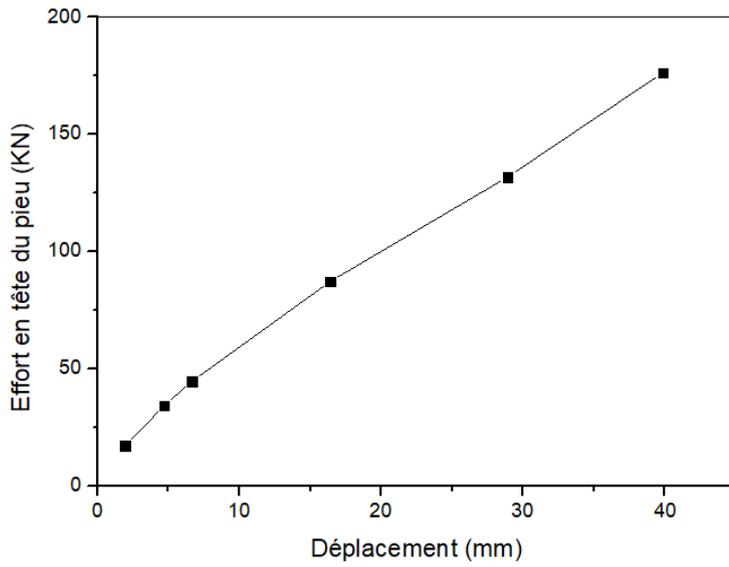
Courbe de chargement cas n° : 84-41



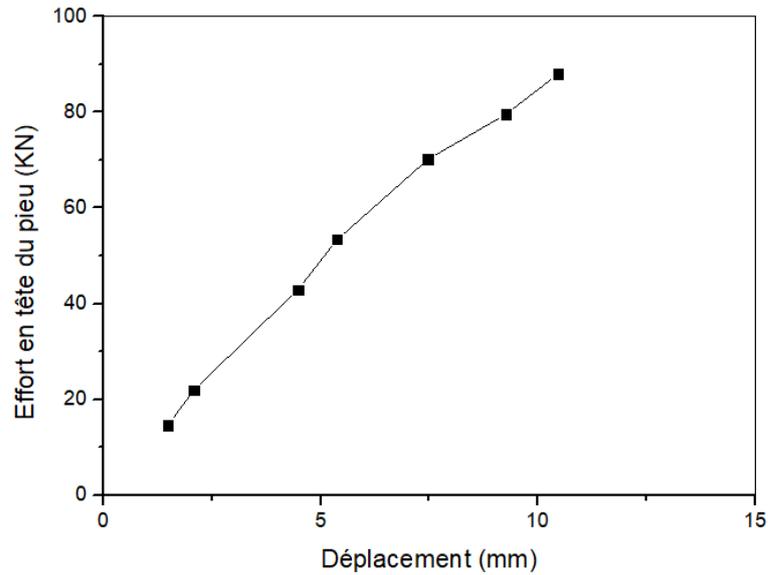
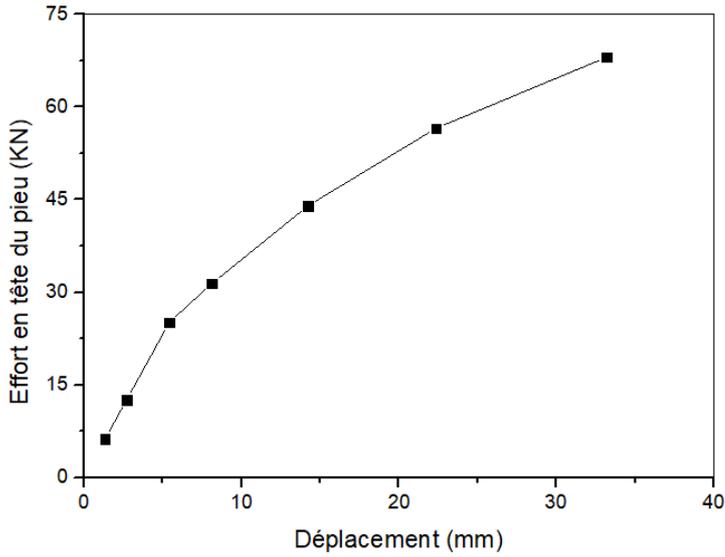
Courbe de chargement cas n° : 85-41



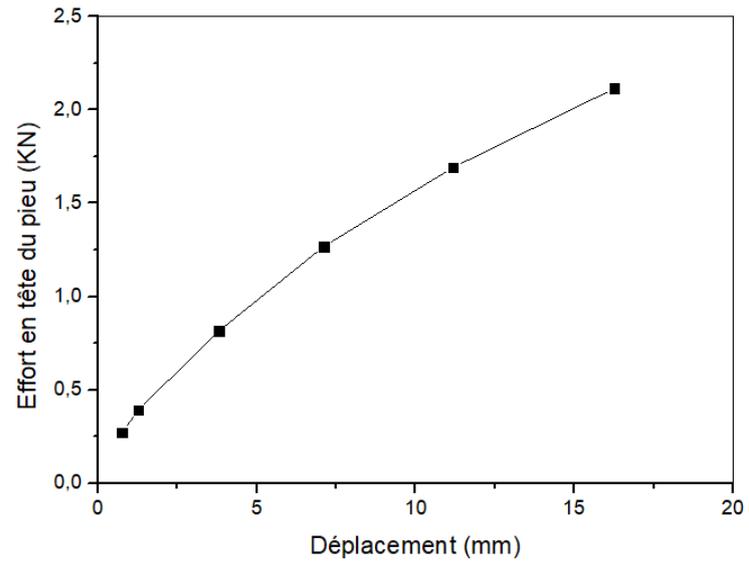
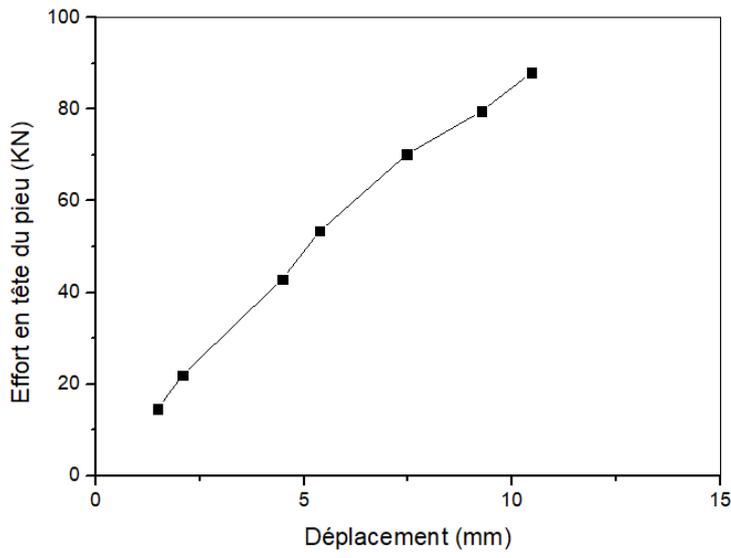
Courbe de chargement cas n° : 99-283



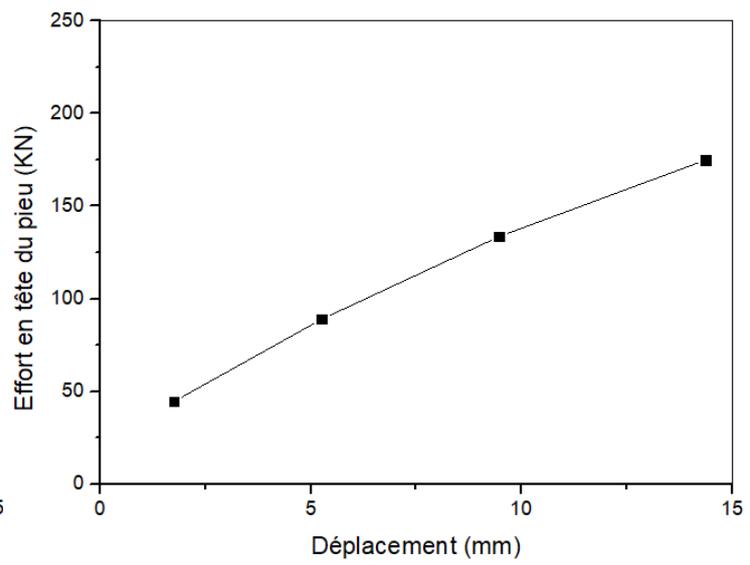
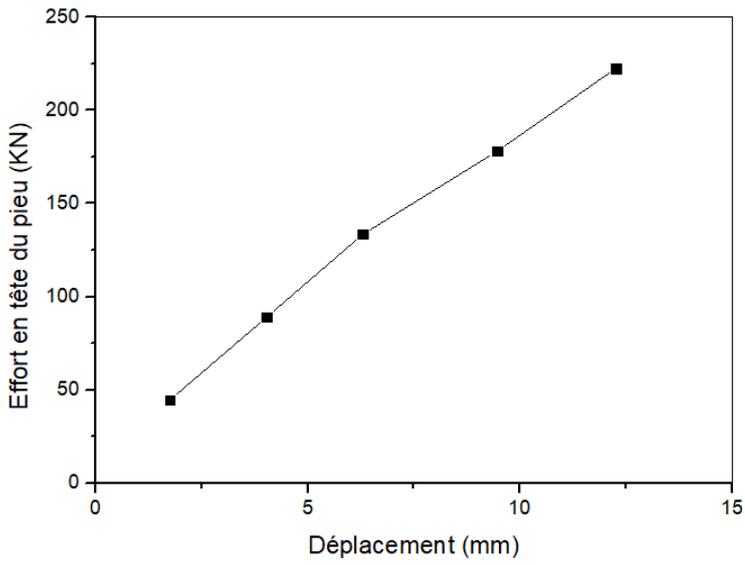
Courbe de chargement cas n° : 100-283 Courbe de chargement cas n° : 101-283



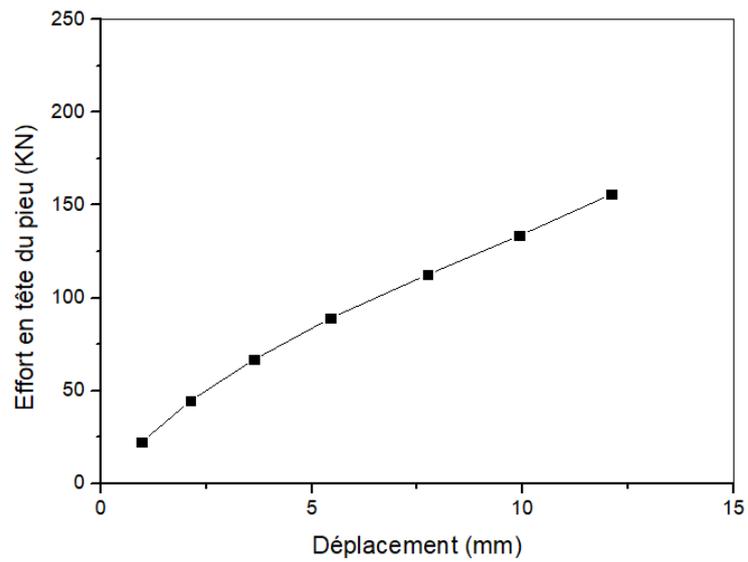
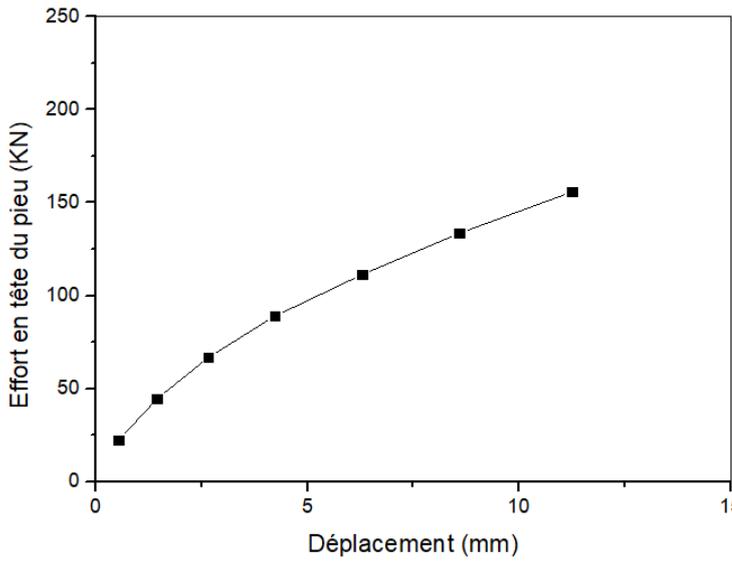
Courbe de chargement cas n° : 102-283 Courbe de chargement cas n° : 103-283



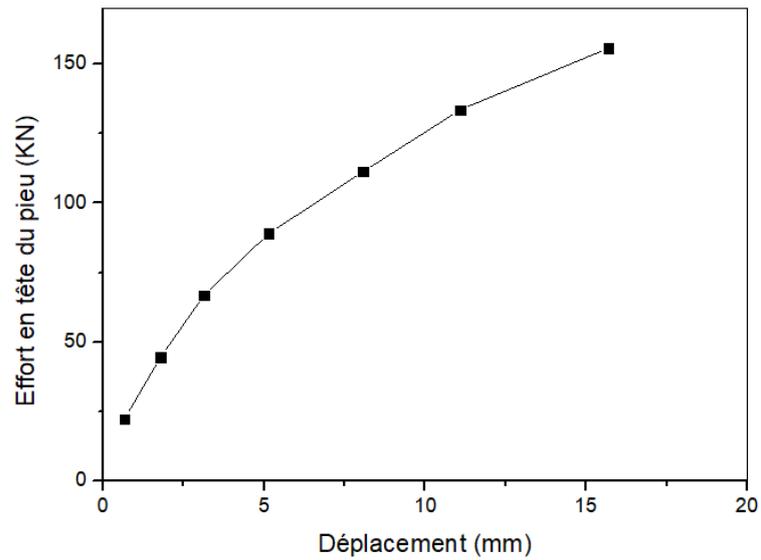
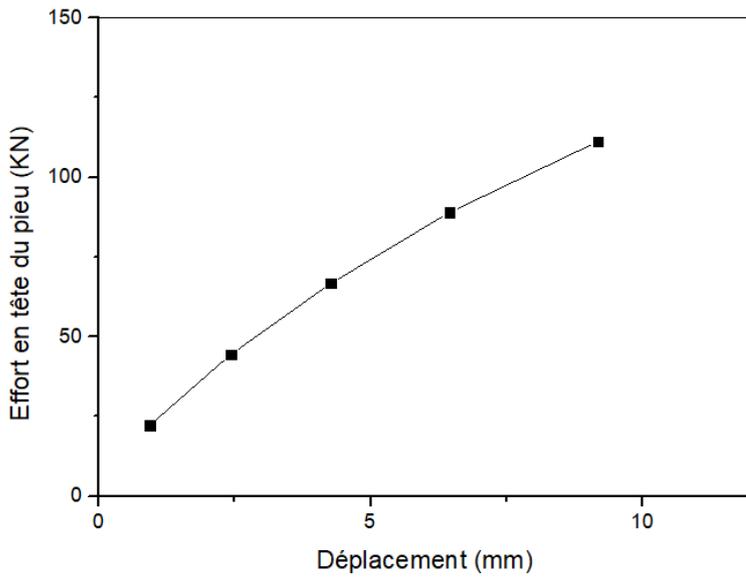
Courbe de chargement cas n° : 104-283 Courbe de chargement cas n° : 105-283



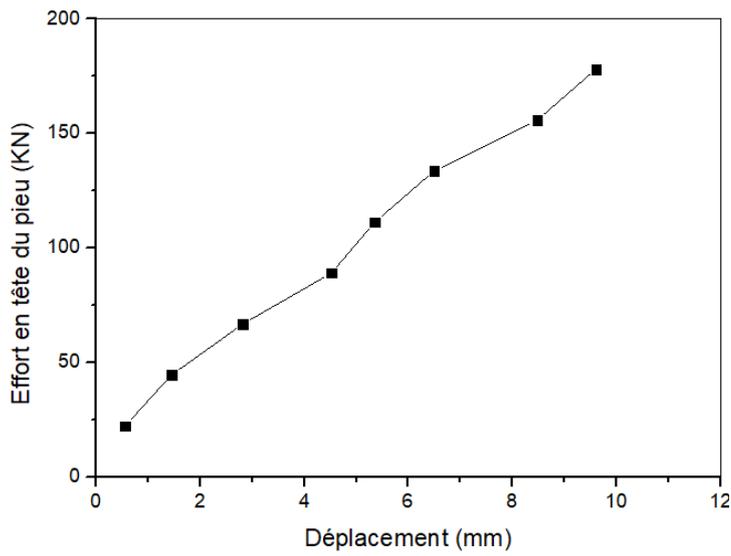
Courbe de chargement cas n° : 106-283 Courbe de chargement cas n° : 107-283



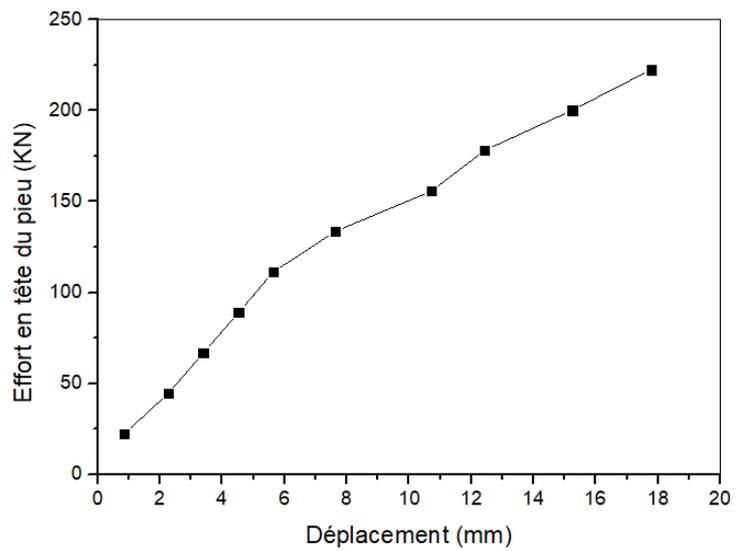
Courbe de chargement cas n° : 108-283 Courbe de chargement cas n° : 109-283



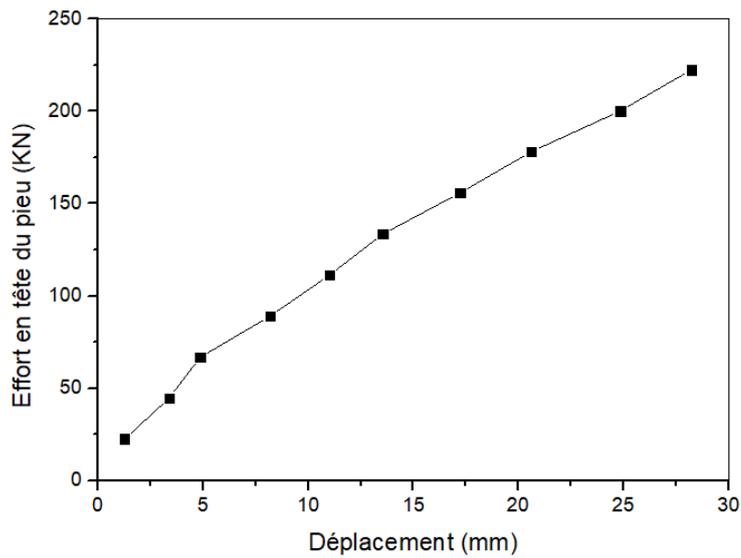
Courbe de chargement cas n° : 110-283 Courbe de chargement cas n° : 111-283



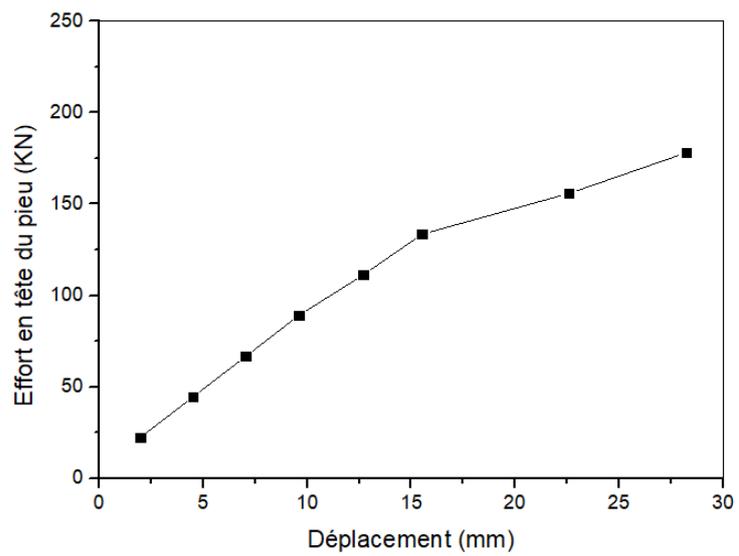
Courbe de chargement cas n° : 114-1315



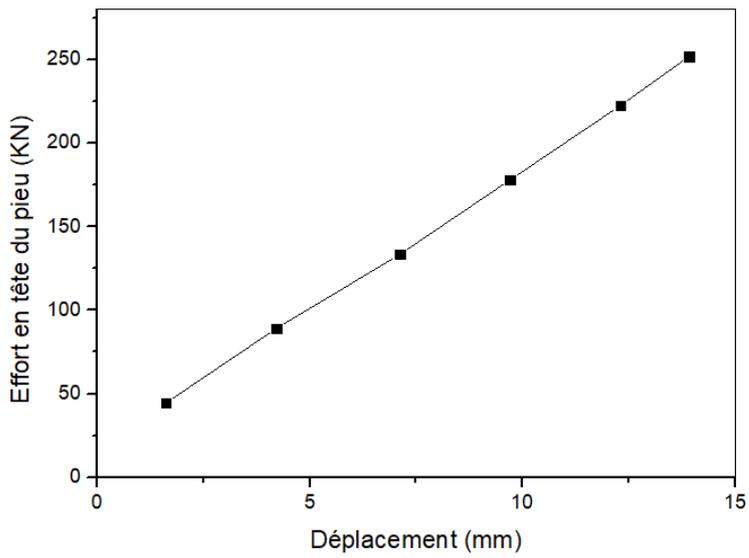
**Courbe de chargement cas n° :
115-1315**



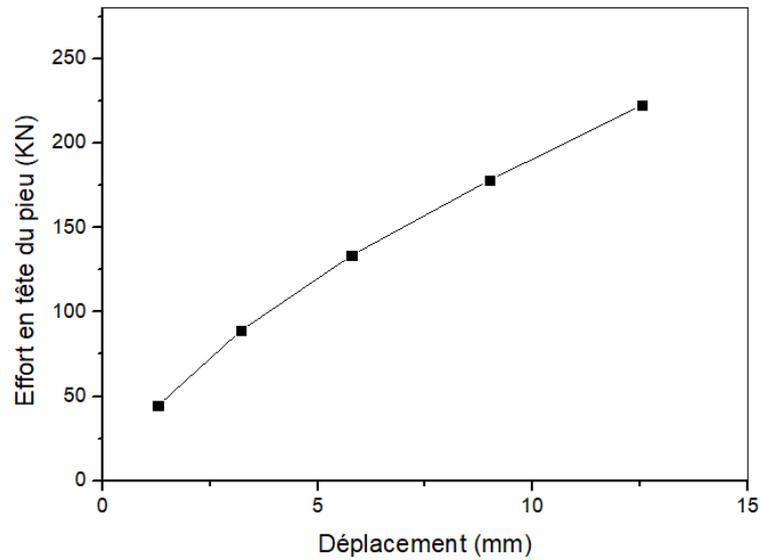
Courbe de chargement cas n° : 116-1315



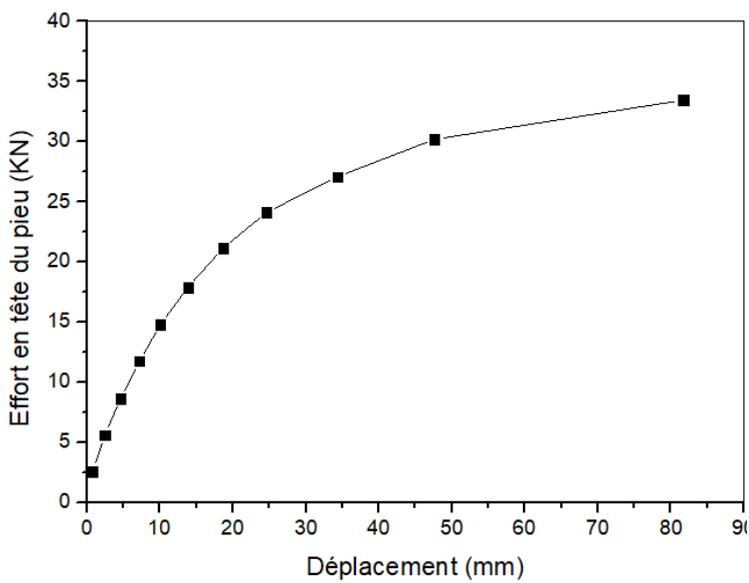
**Courbe de chargement cas n° :
117-1315**



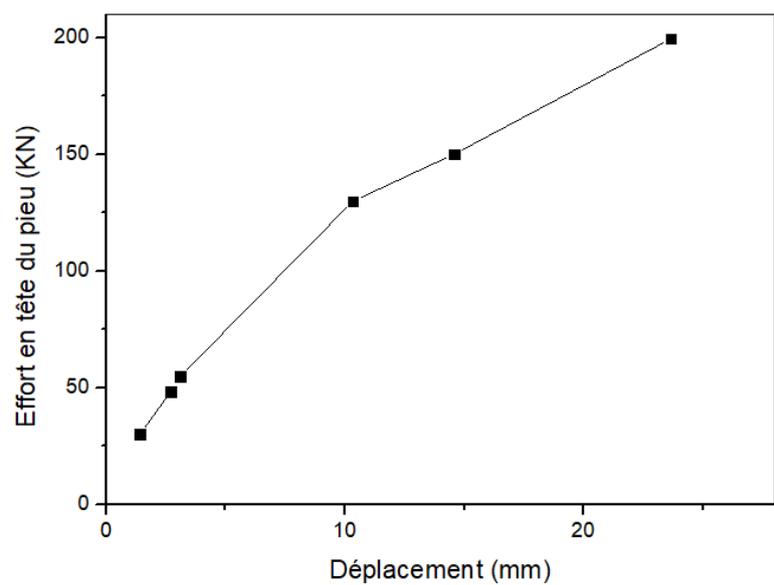
Courbe de chargement cas n° : 130-41



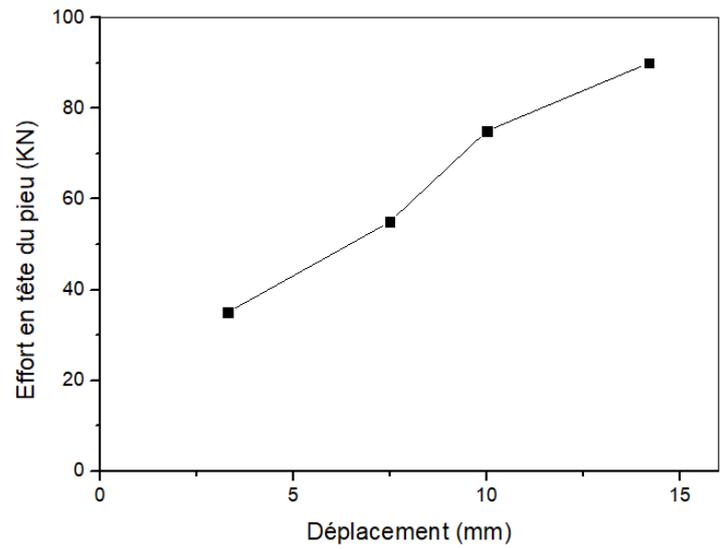
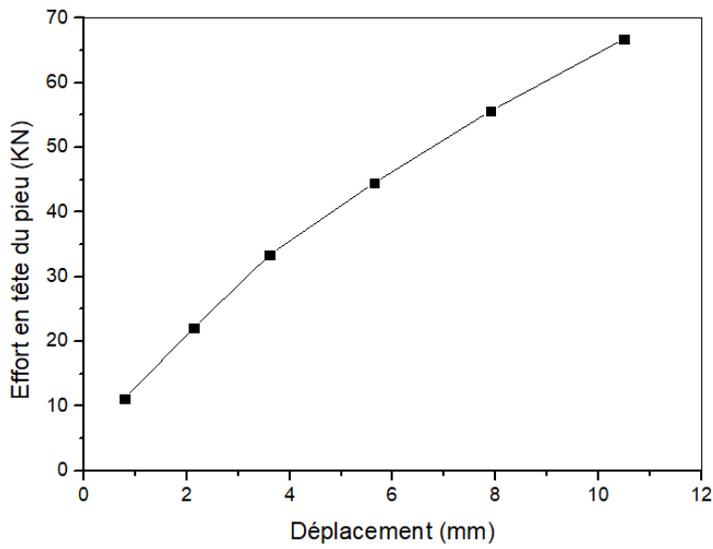
Courbe de chargement cas n° : 131-41



Courbe de chargement cas n° : 161-146

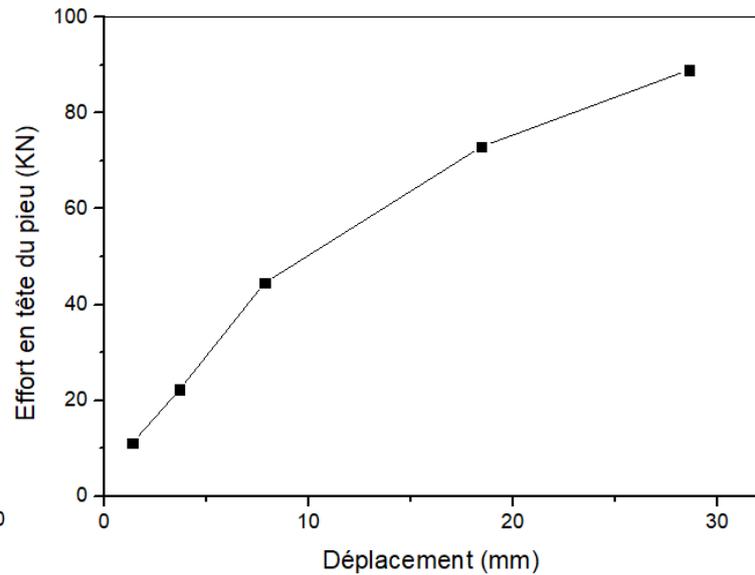
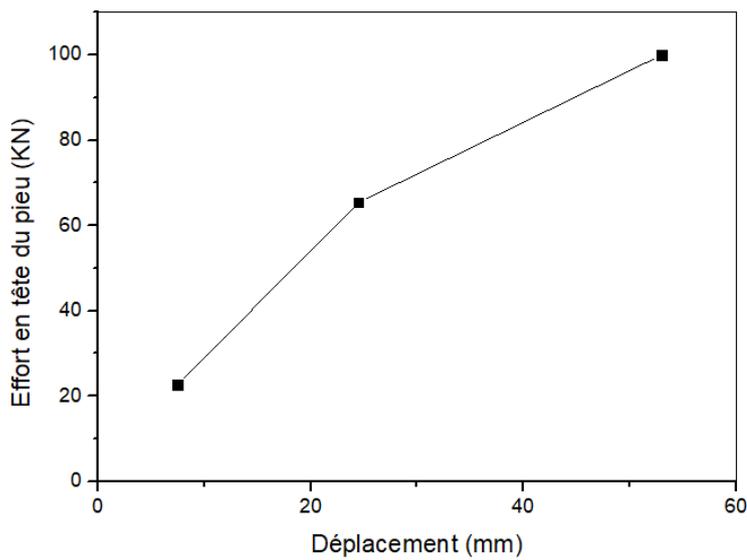


Courbe de chargement cas n° : 161-146

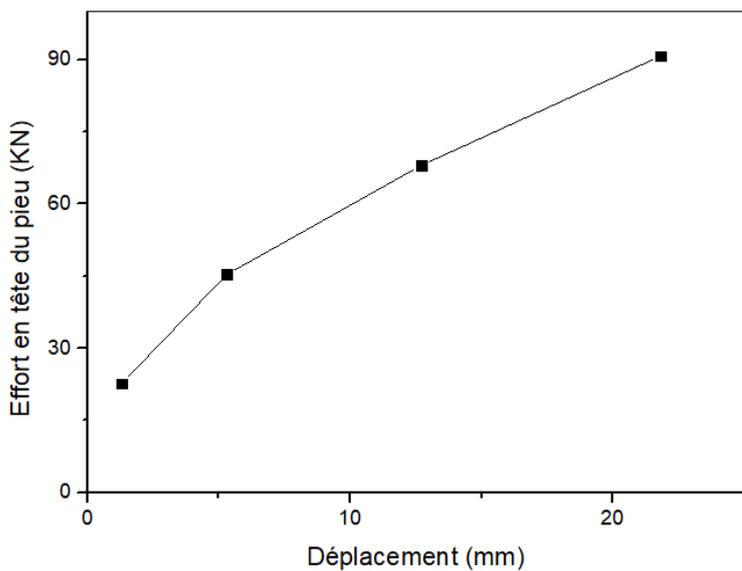


Courbe de chargement cas n° : 168-146 Courbe de chargement cas n° : 08-578

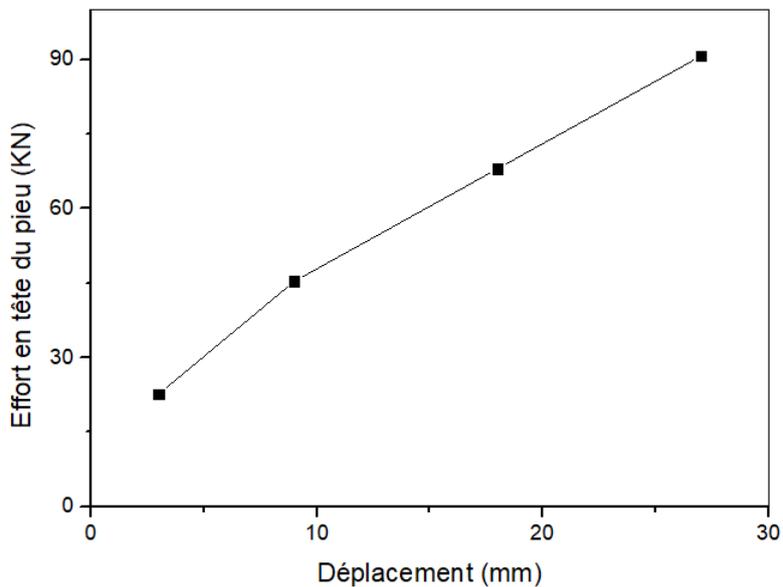
Sols argileux



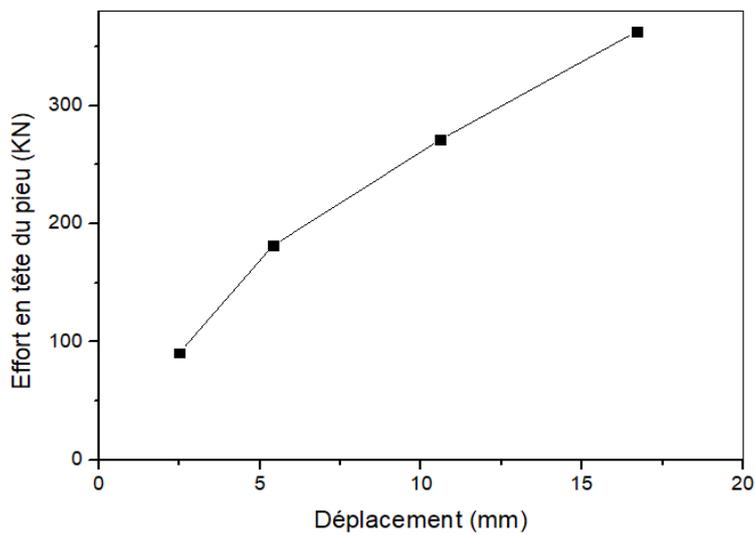
Courbe de chargement cas n° : 10-562 Courbe de chargement cas n° : 17-428



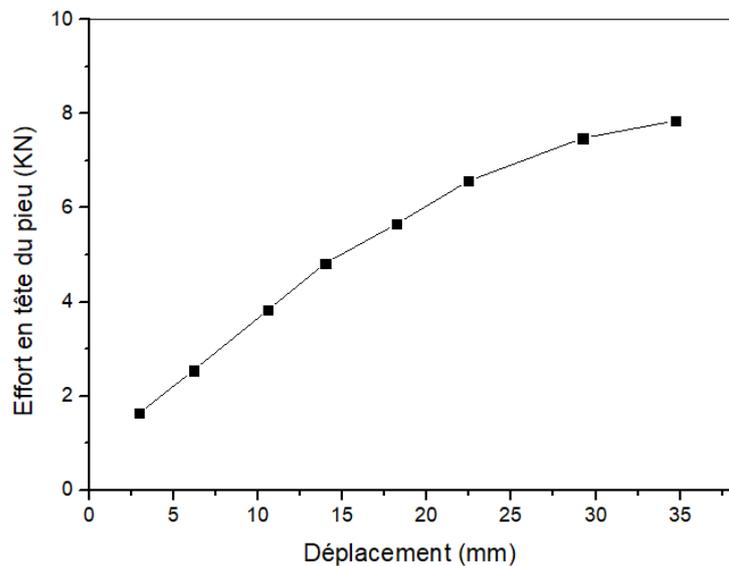
Courbe de chargement cas n° : 24-403



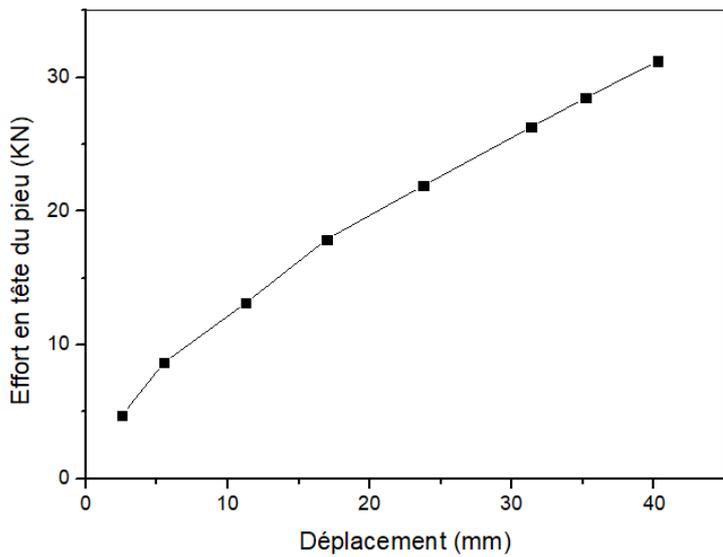
Courbe de chargement cas n° : 26-414



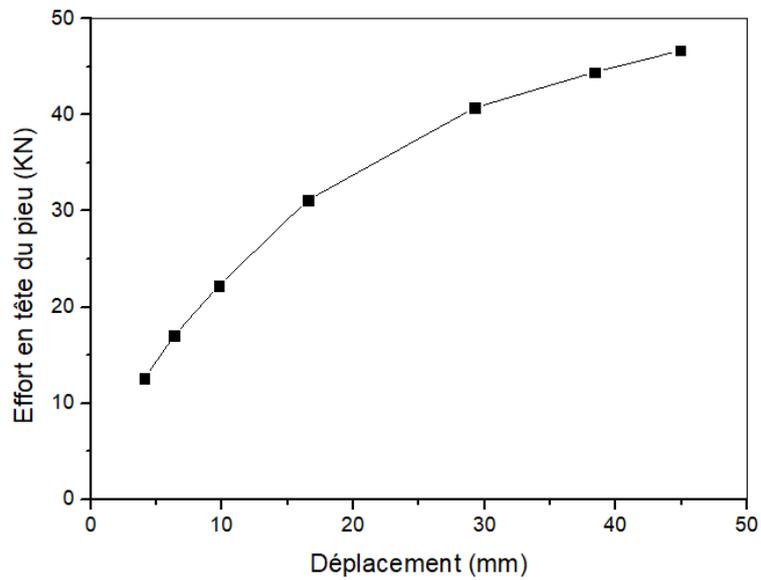
Courbe de chargement cas n° : 29-403



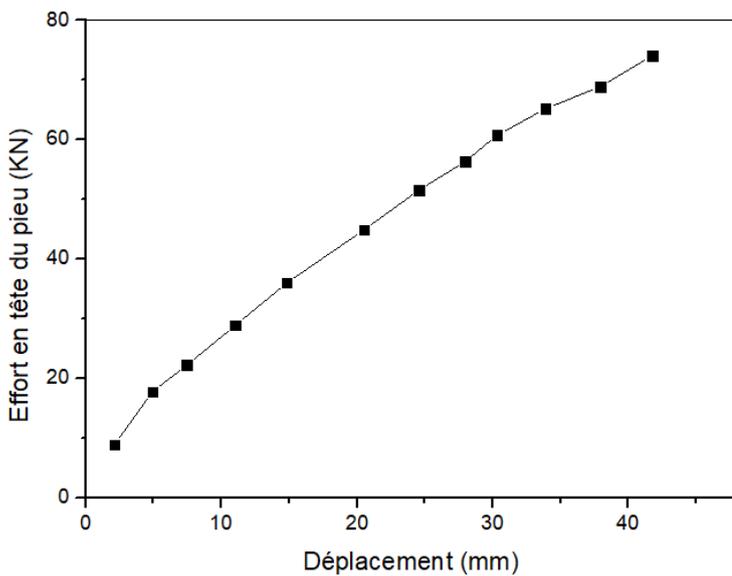
Courbe de chargement cas n° : 34-851



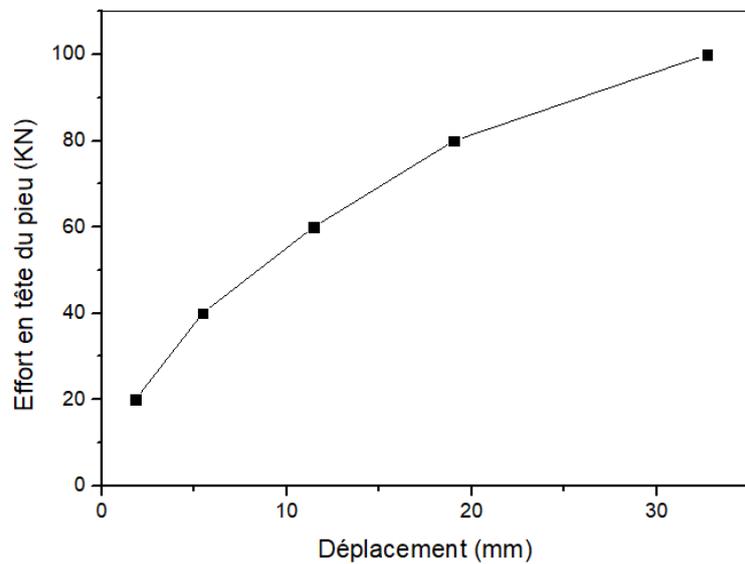
Courbe de chargement cas n° : 35-851



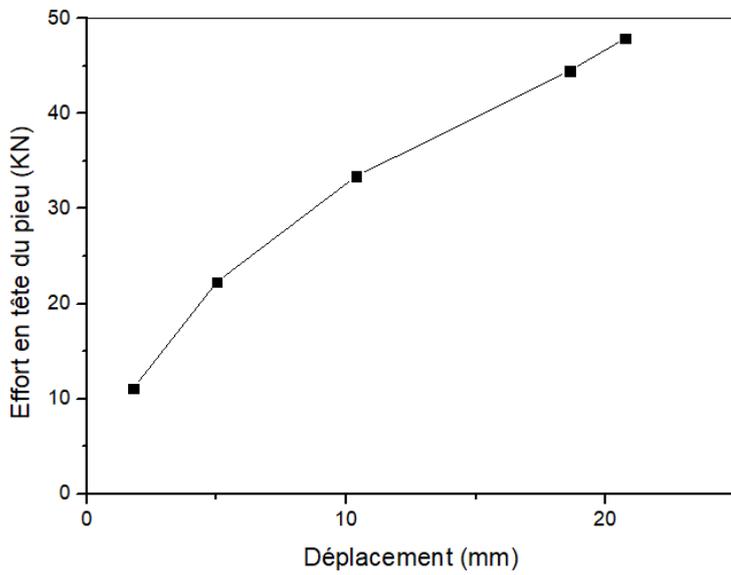
Courbe de chargement cas n° : 36-851



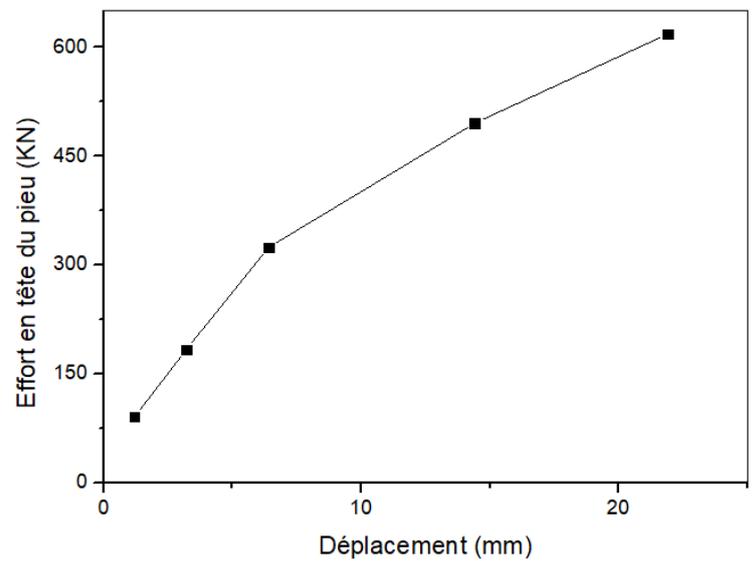
Courbe de chargement cas n° : 37-851



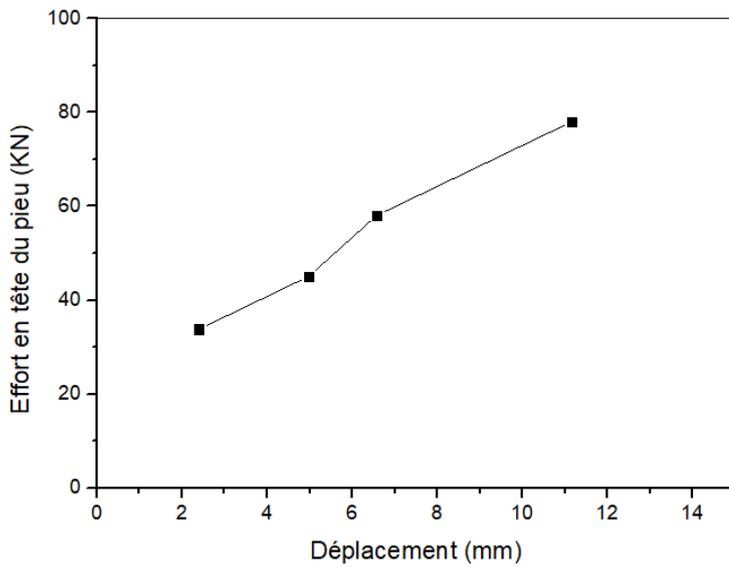
Courbe de chargement cas n° : 48-850



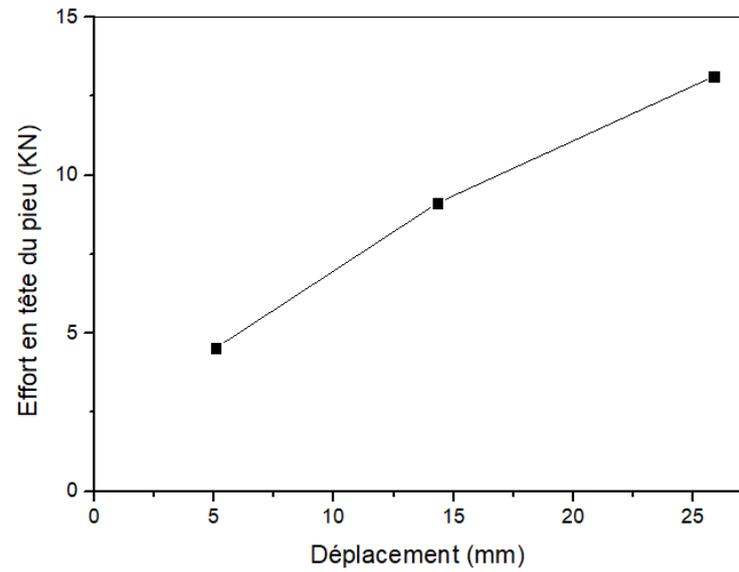
Courbe de chargement cas n° : 62-673



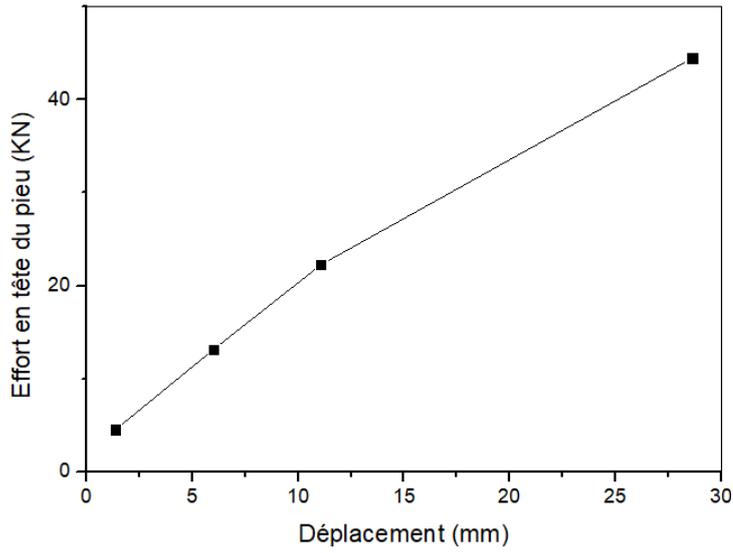
Courbe de chargement cas n° : 71-673



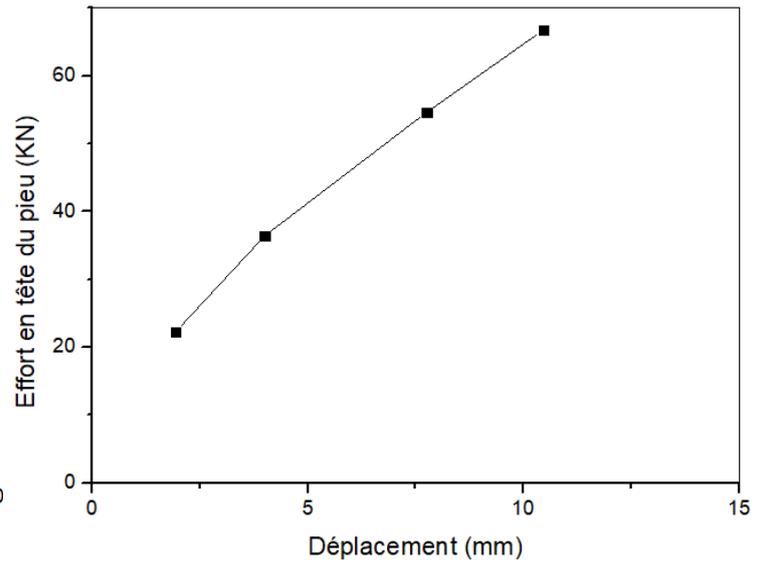
Courbe de chargement cas n° : 86-283



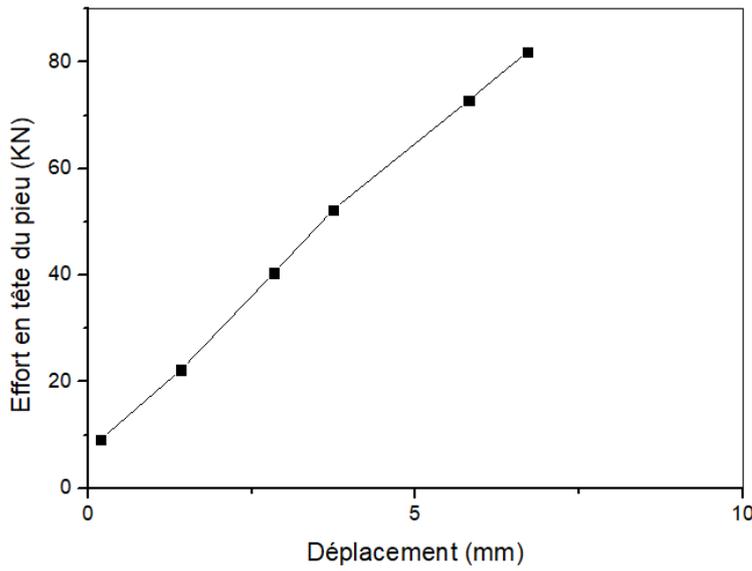
Courbe de chargement cas n° : 89-283



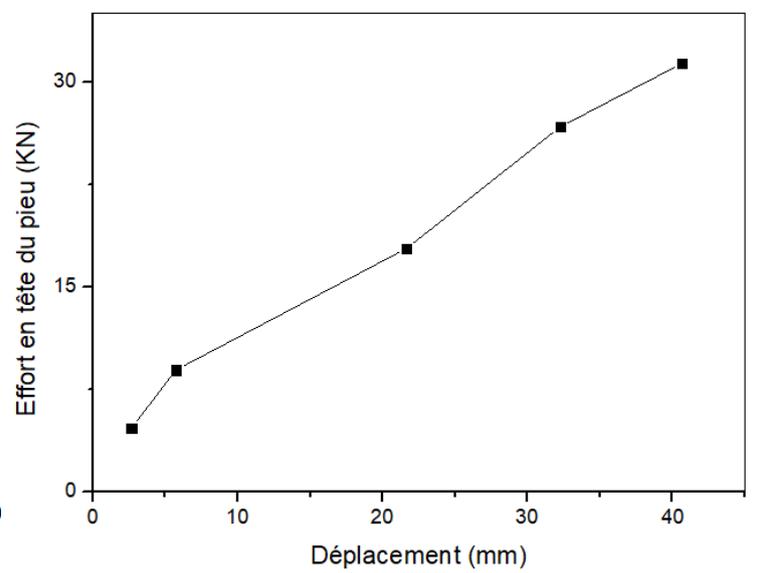
Courbe de chargement cas n° : 90-283



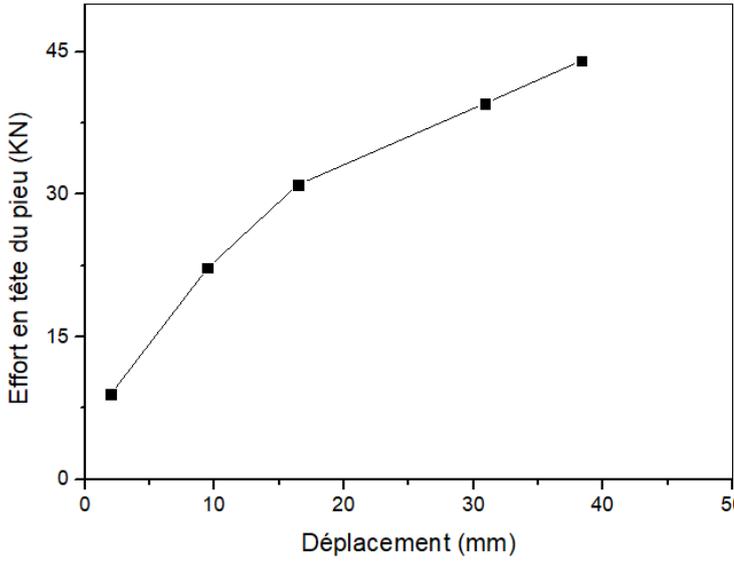
Courbe de chargement cas n° : 91-283



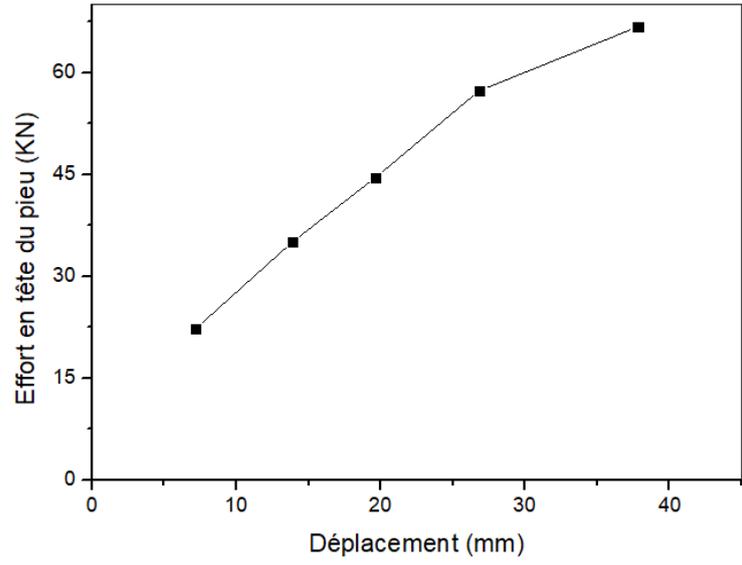
Courbe de chargement cas n° : 92-283



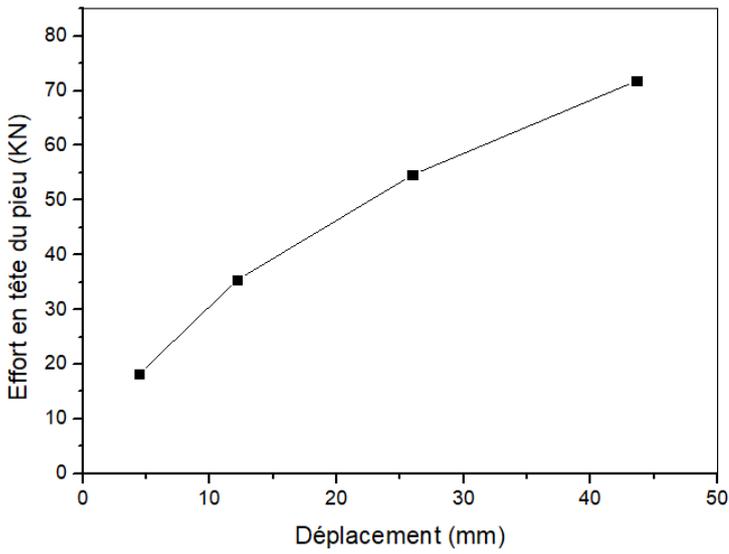
Courbe de chargement cas n° : 94-283



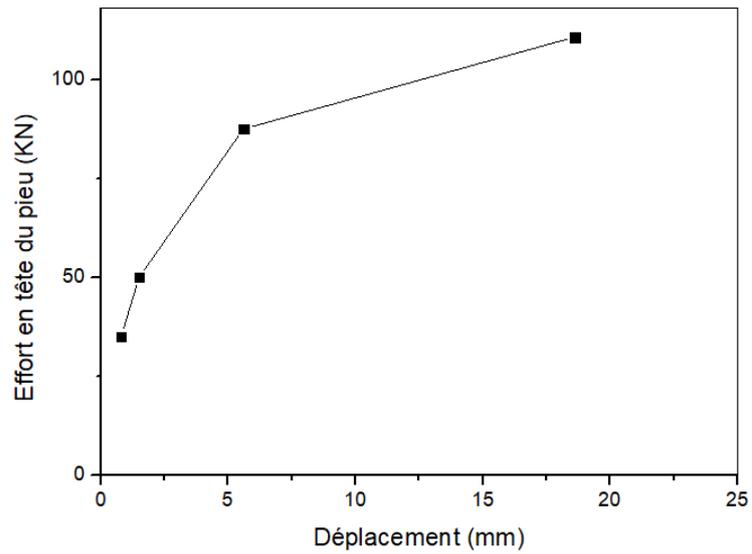
Courbe de chargement cas n° : 95-283



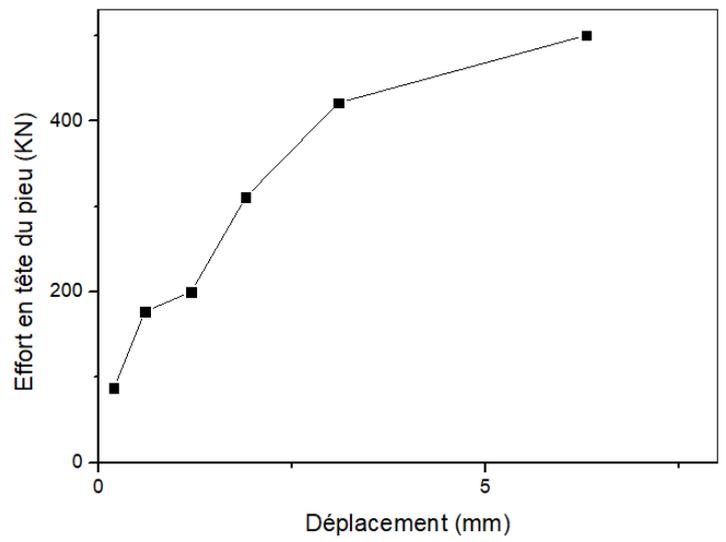
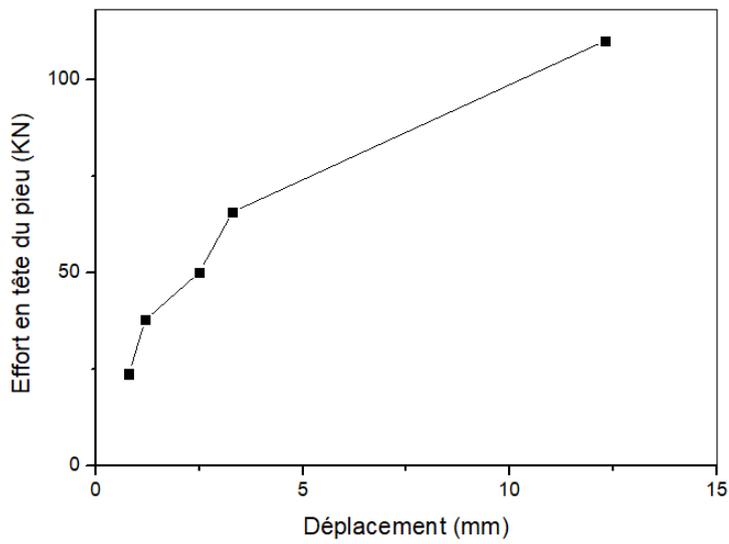
Courbe de chargement cas n° : 96-283



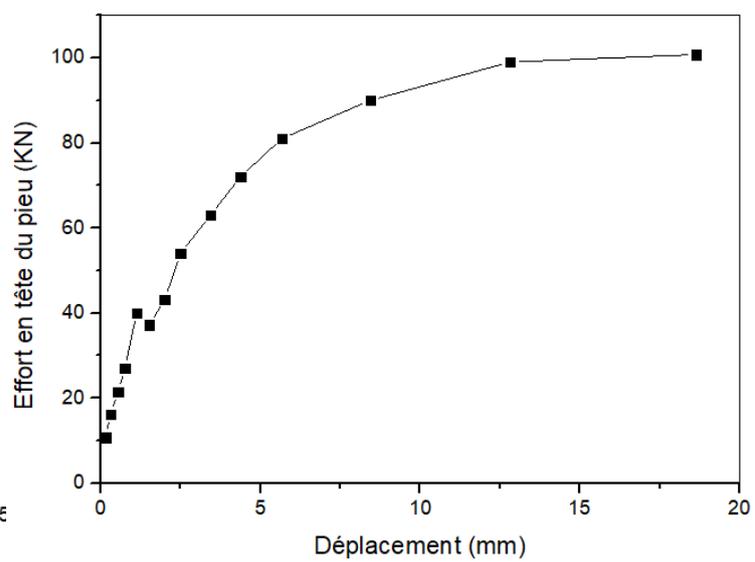
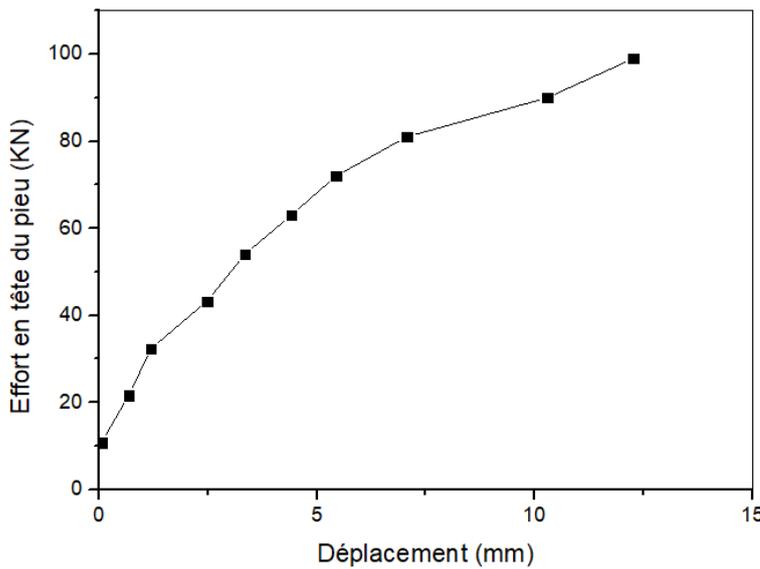
Courbe de chargement cas n° : 98-283



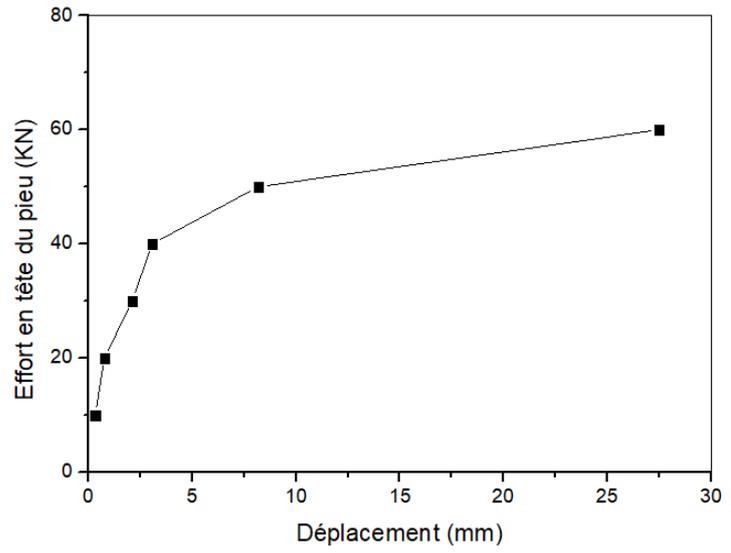
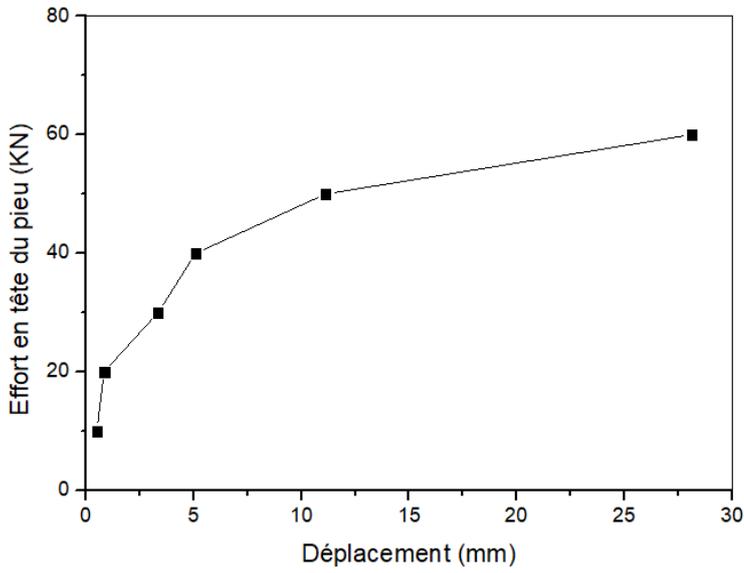
Courbe de chargement cas n° : 118-512



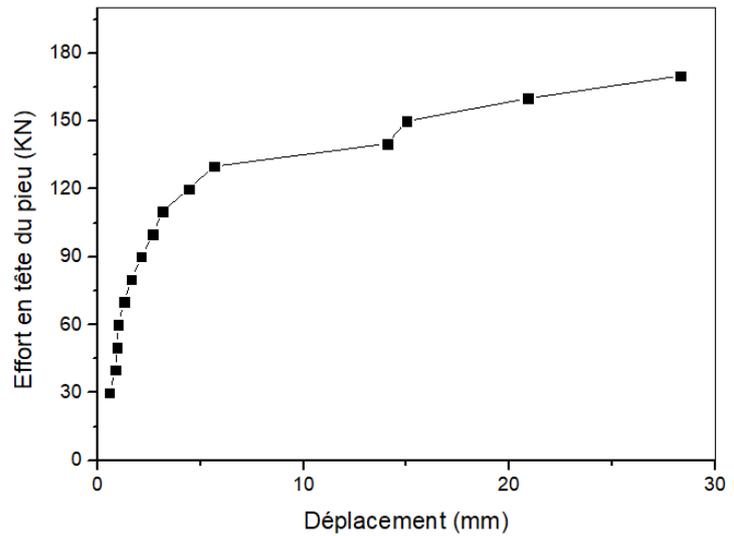
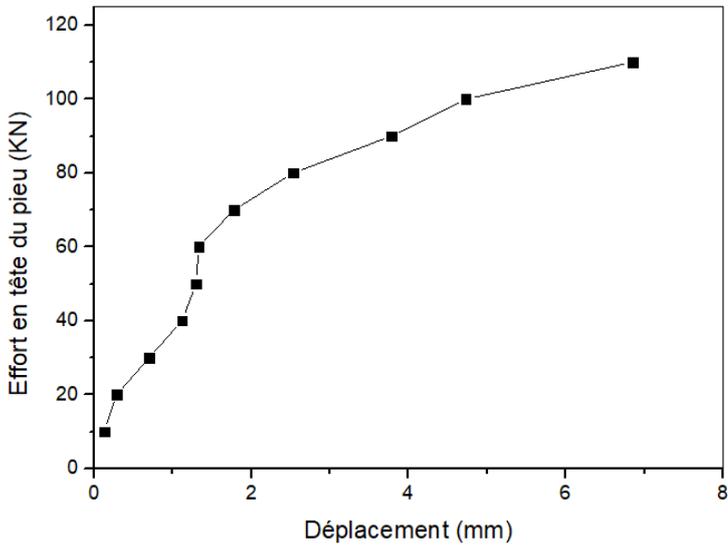
Courbe de chargement cas n° : 119-512 Courbe de chargement cas n° : 120 -512



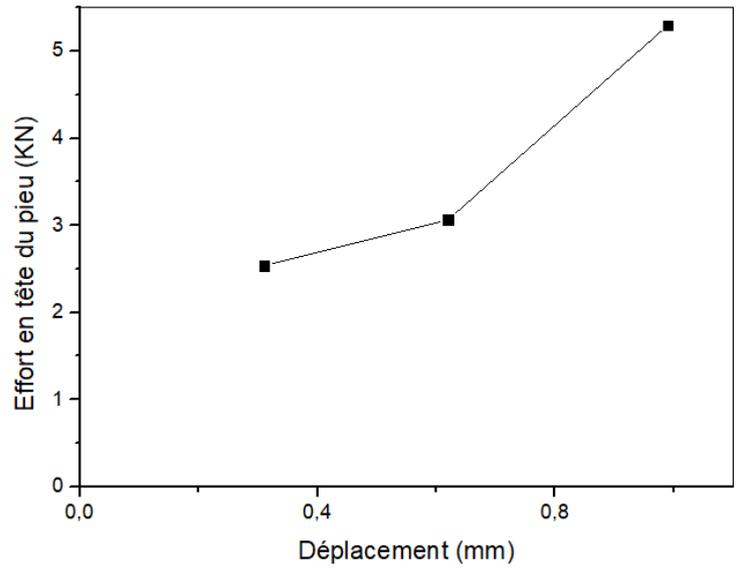
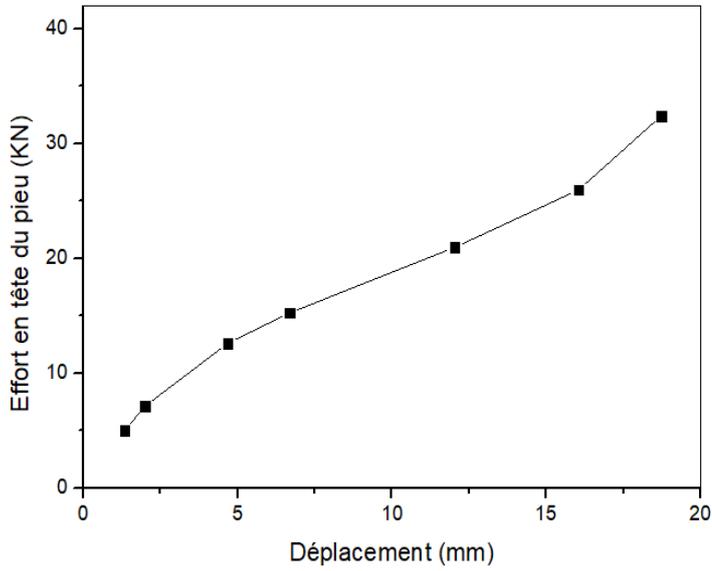
Courbe de chargement cas n° : 121-512 Courbe de chargement cas n° : 122 -512



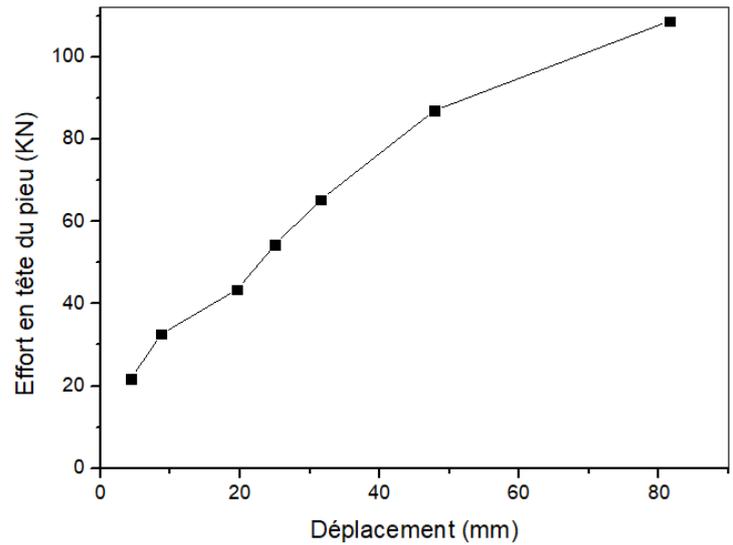
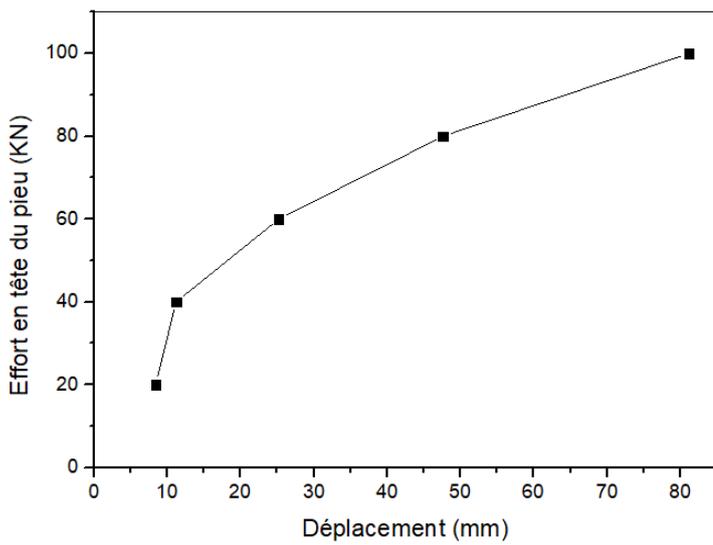
Courbe de chargement cas n° : 123-512 Courbe de chargement cas n° : 124 -512



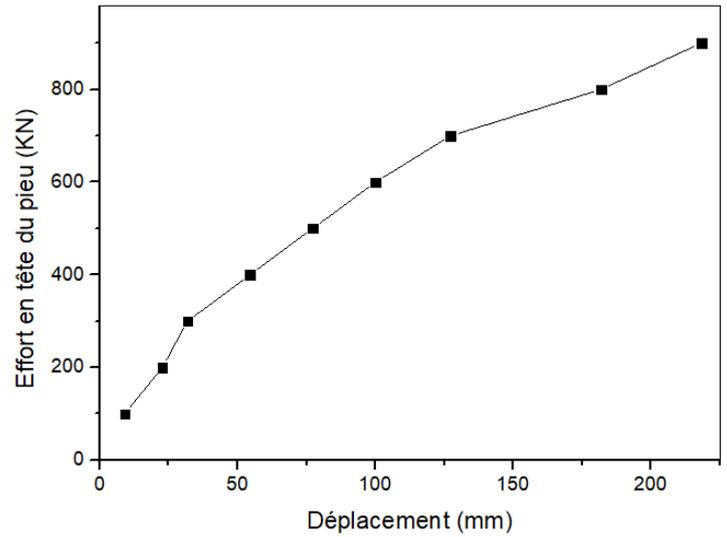
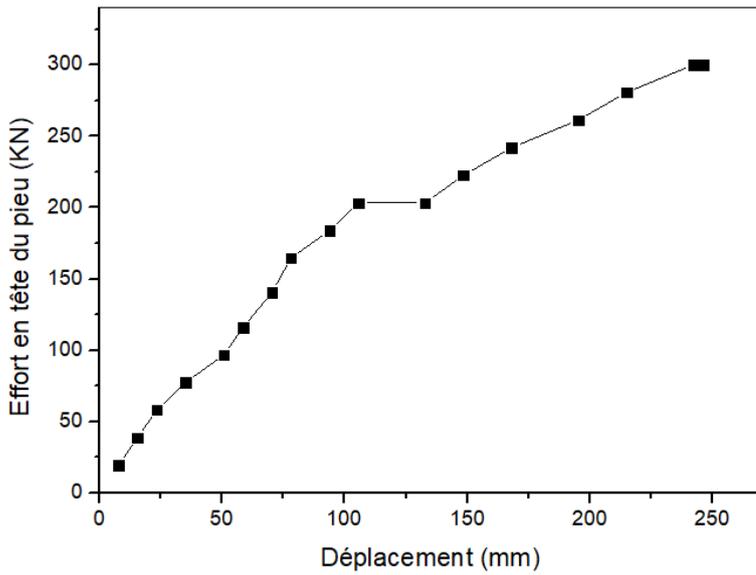
Courbe de chargement cas n° : 125-512 Courbe de chargement cas n° : 126 -512



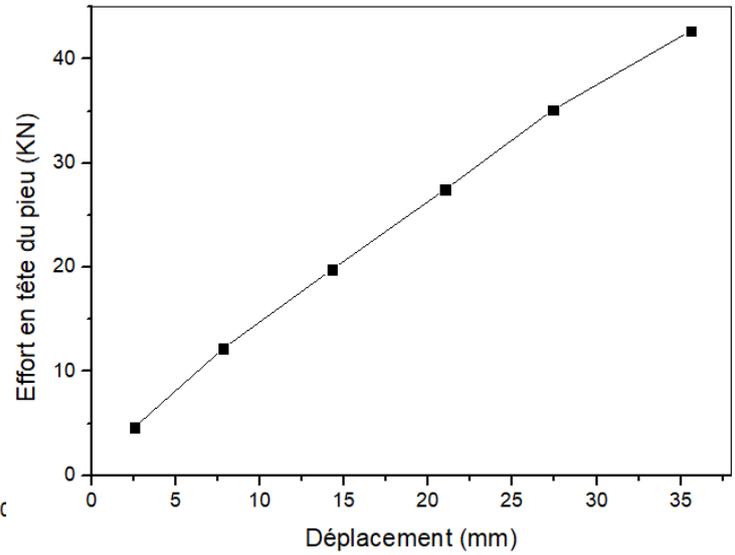
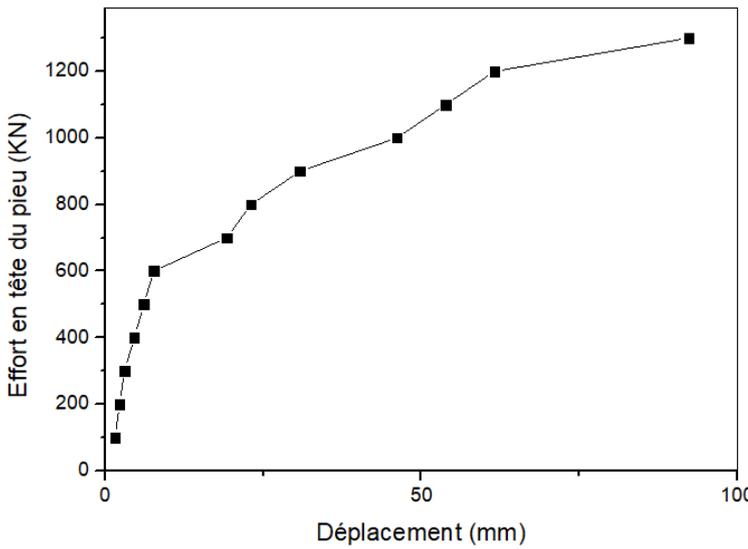
Courbe de chargement cas n° : 128-512 Courbe de chargement cas n° : 140 -512



Courbe de chargement cas n° : 142-85 Courbe de chargement cas n° : 155 -633

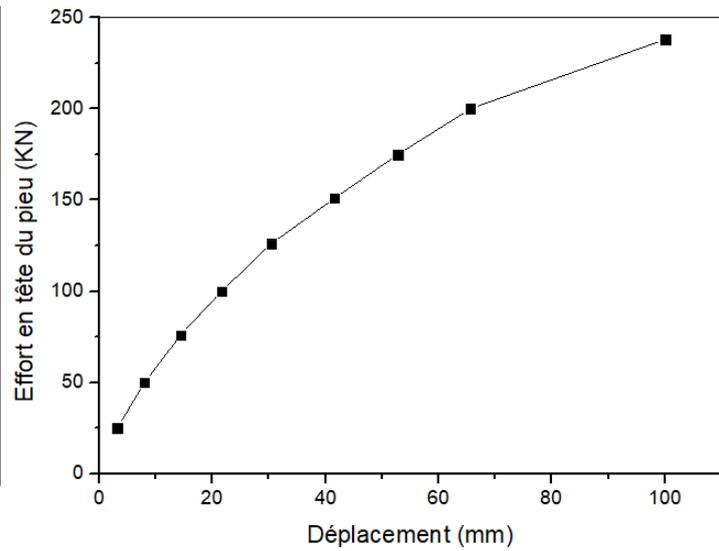
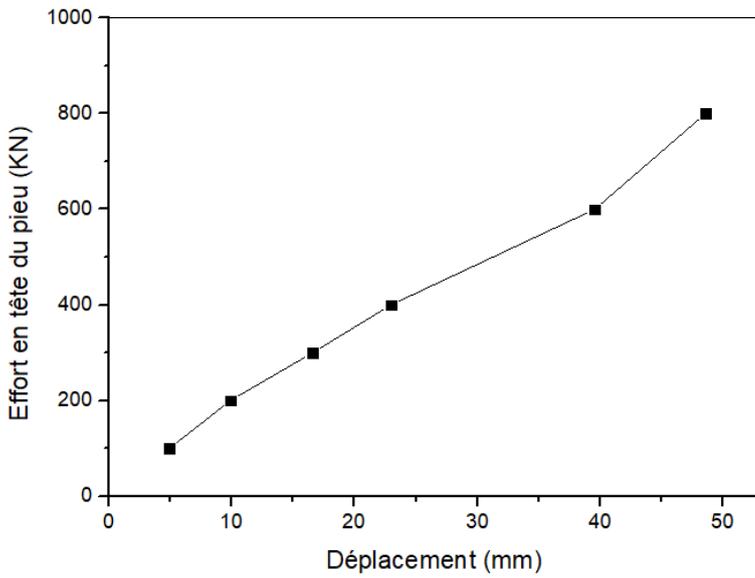


Courbe de chargement cas n° : 158-864 Courbe de chargement cas n° : 159 -864



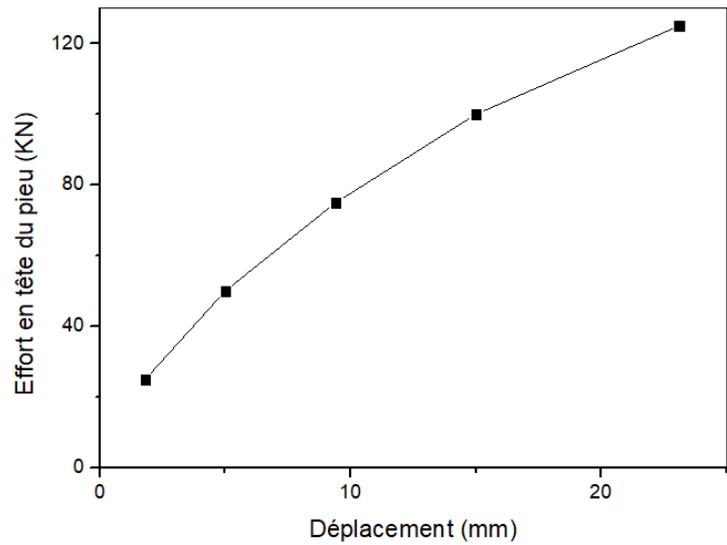
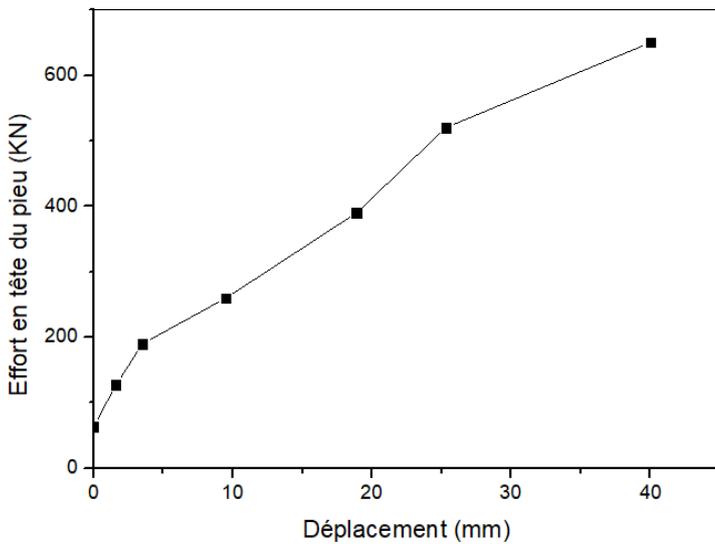
Courbe de chargement cas n° : 160-864 Courbe de chargement cas n° : 03 -192

Sols multicouches



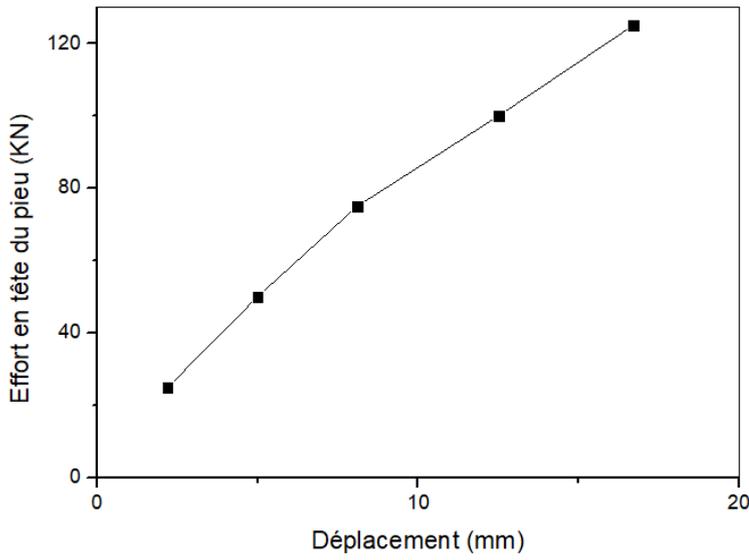
Courbe de chargement cas n° : 12-382

Courbe de chargement cas n° : 13-365

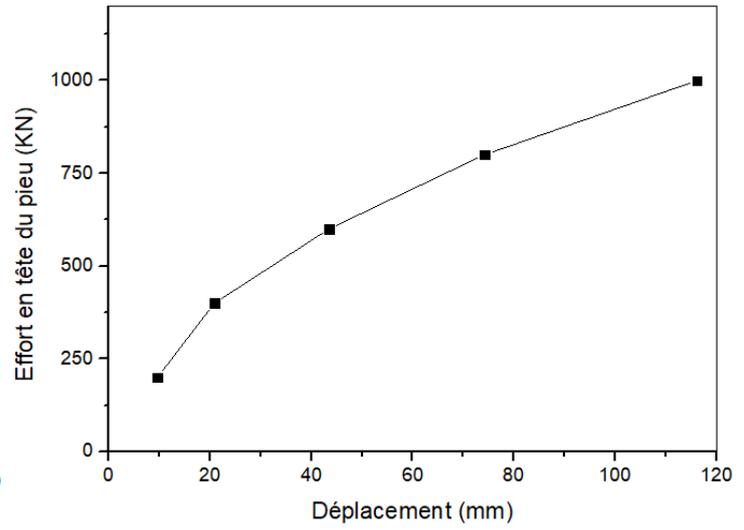


Courbe de chargement cas n° : 16-359

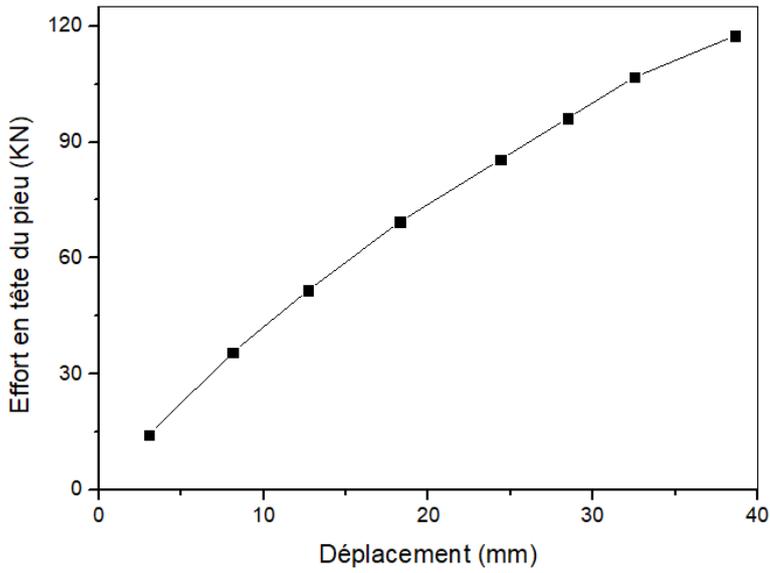
Courbe de chargement cas n° : 19-399



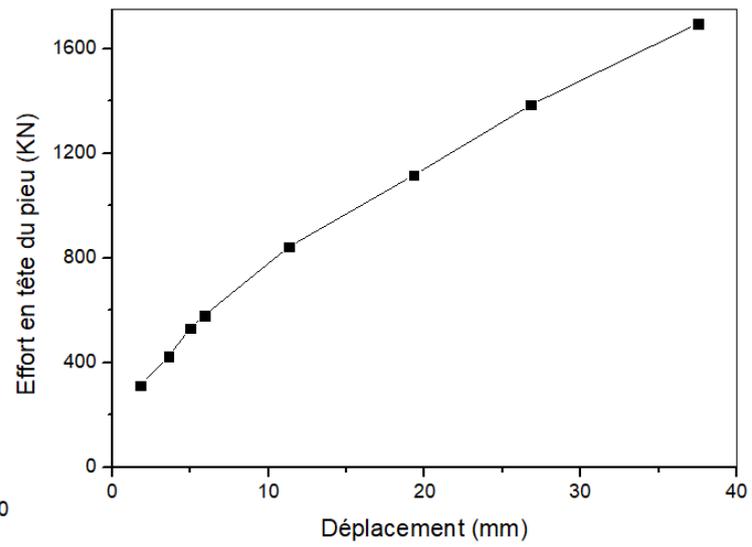
Courbe de chargement cas n° : 20-399



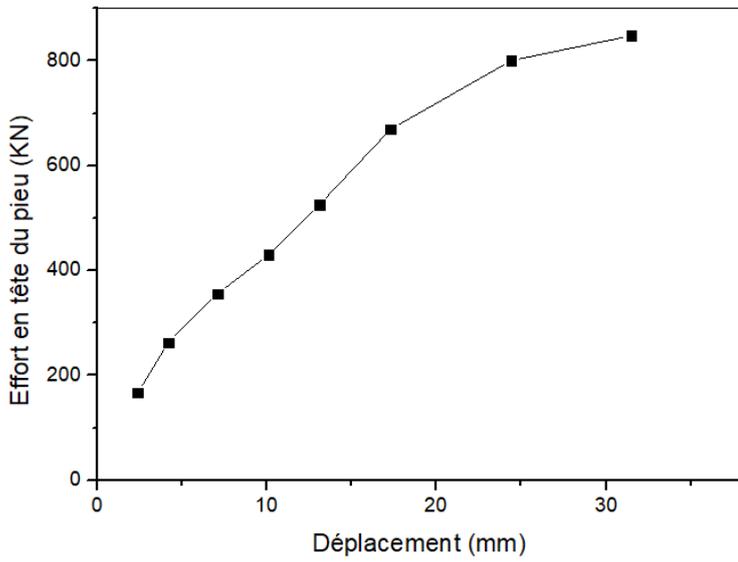
Courbe de chargement cas n° : 21-399



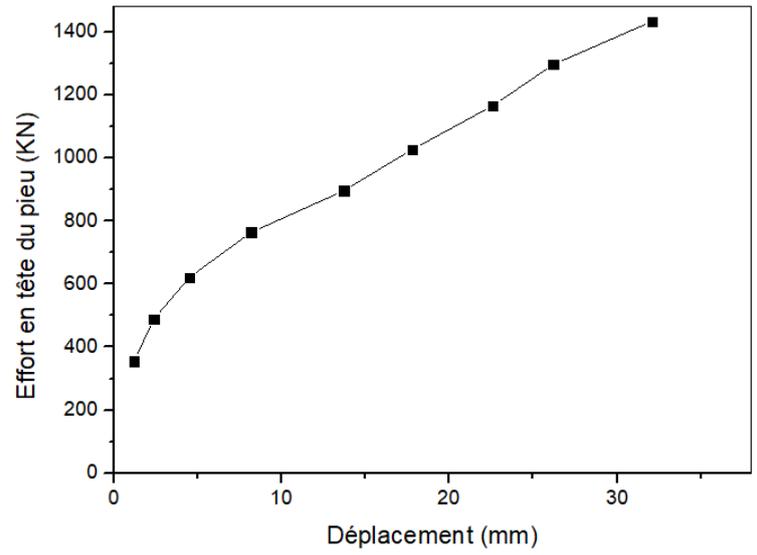
Courbe de chargement cas n° : 23-429



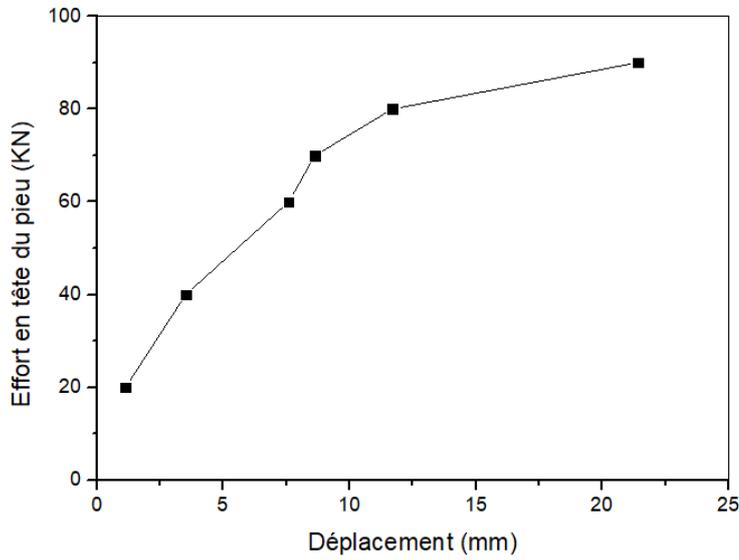
Courbe de chargement cas n° : 38-624



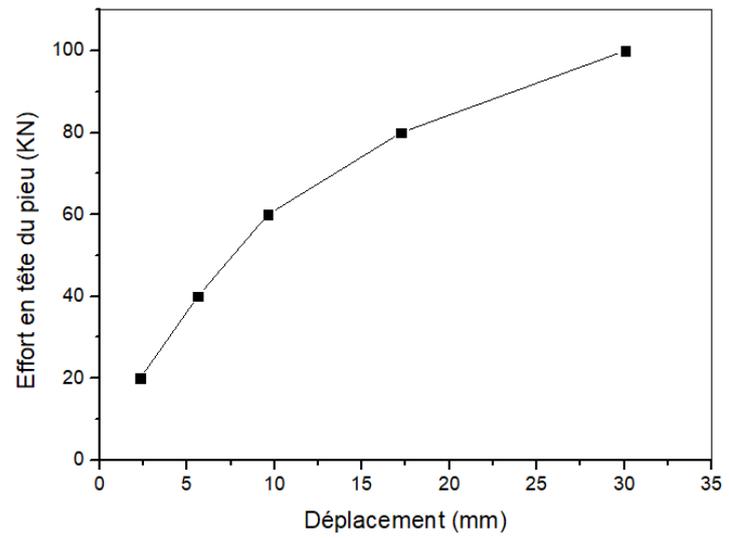
Courbe de chargement cas n° : 39-624



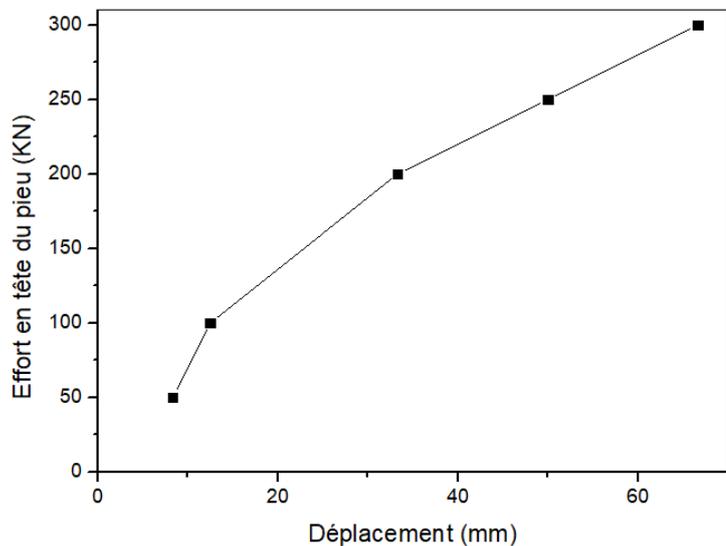
Courbe de chargement cas n° : 40-624



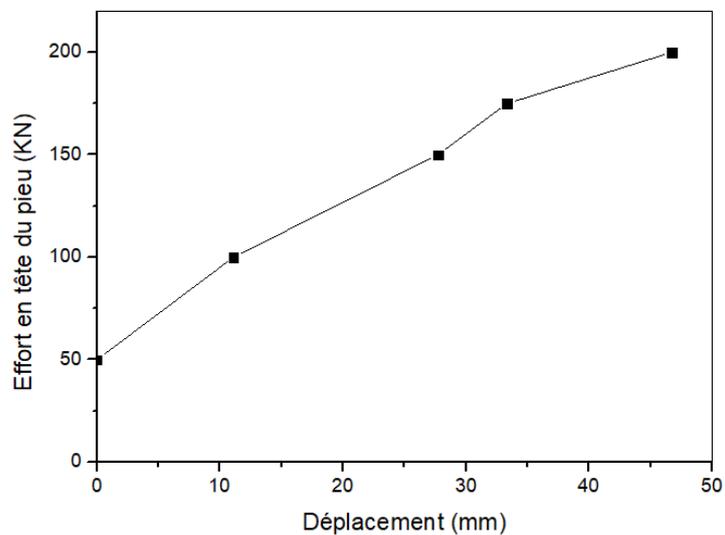
Courbe de chargement cas n° : 41-753



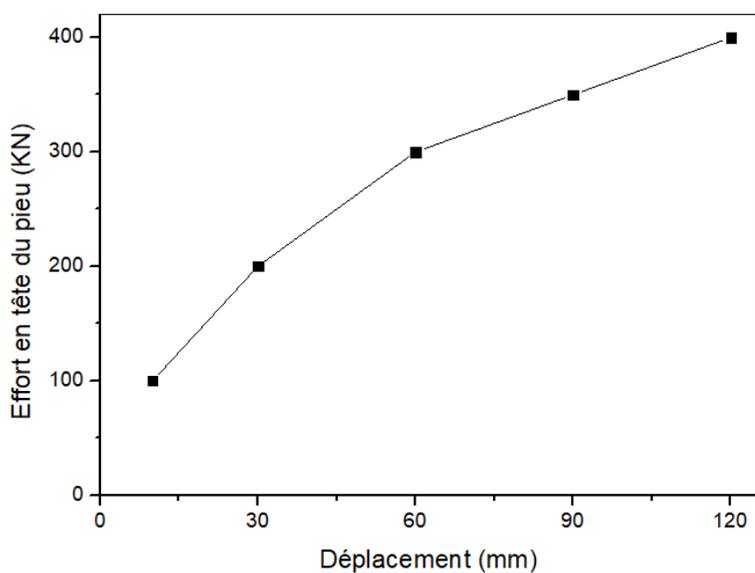
Courbe de chargement cas n° : 42-753



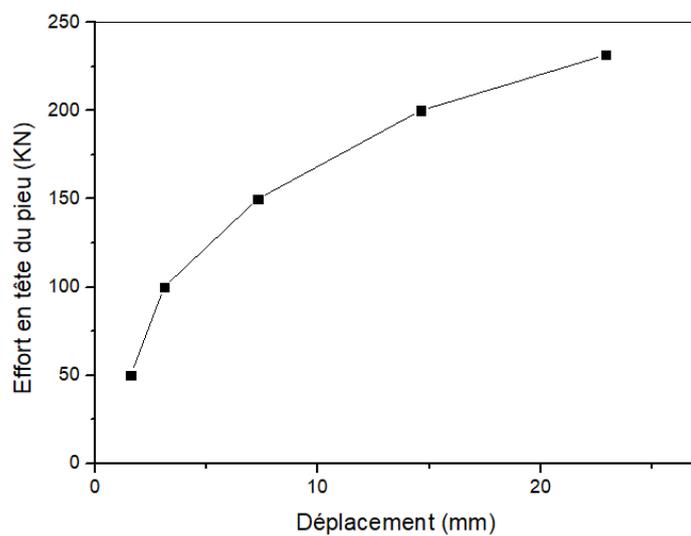
Courbe de chargement cas n° : 43-638



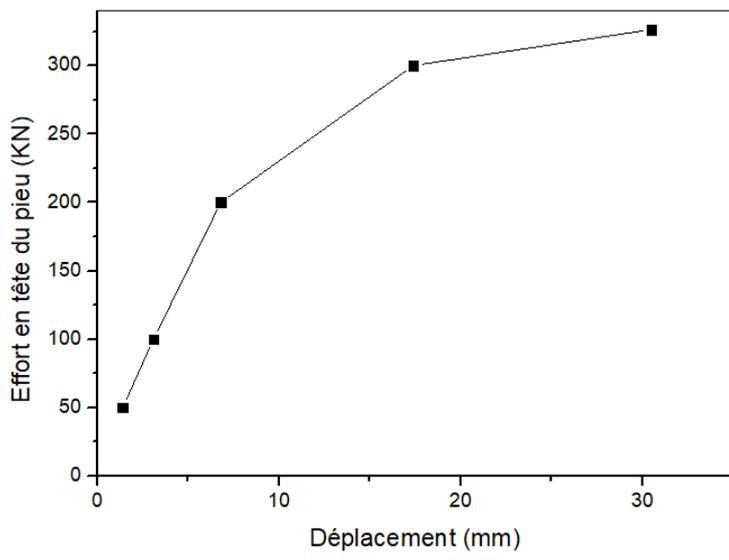
Courbe de chargement cas n° : 45-638



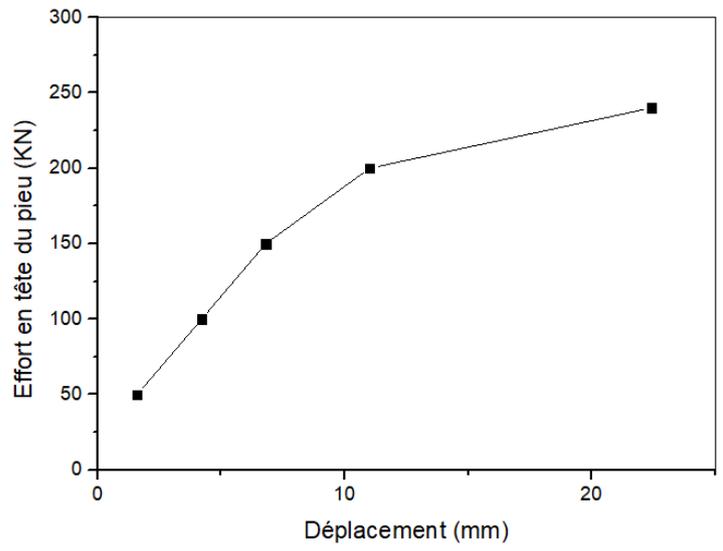
Courbe de chargement cas n° : 46-638



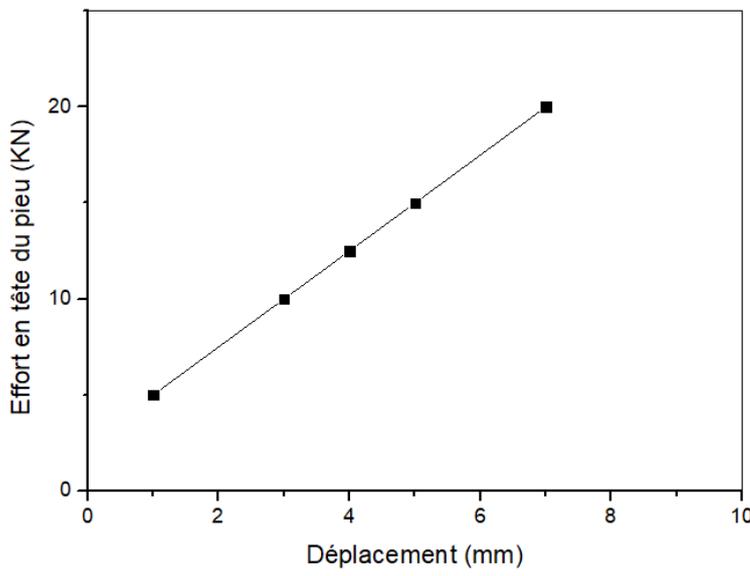
Courbe de chargement cas n° : 59-767



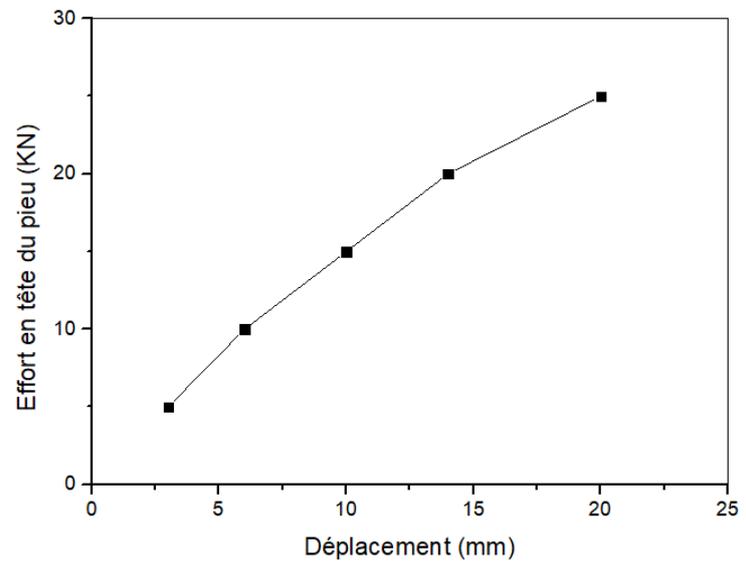
Courbe de chargement cas n° : 60-767



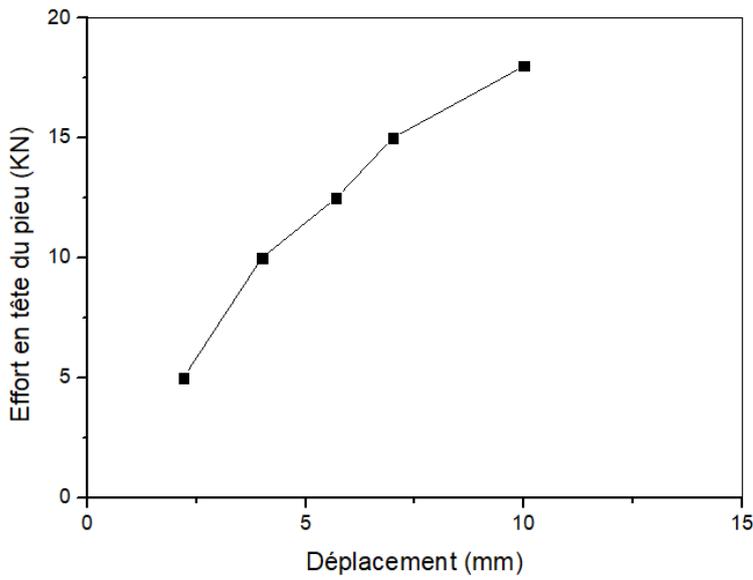
Courbe de chargement cas n° : 61-767



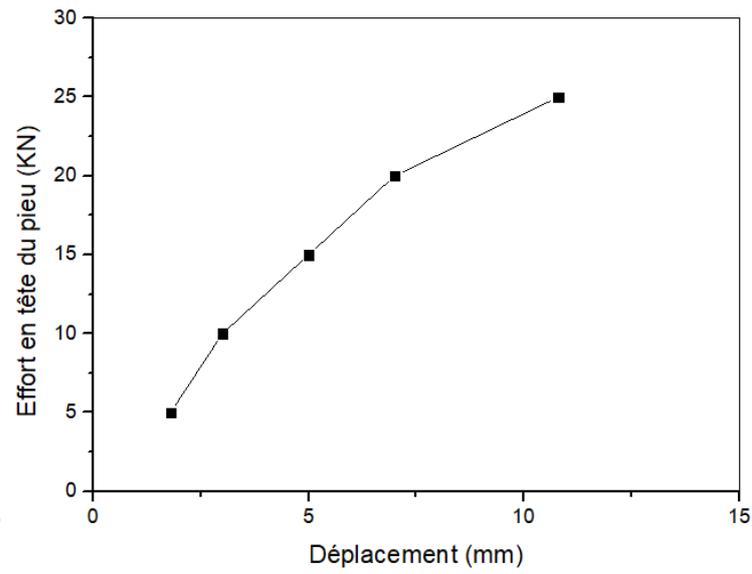
Courbe de chargement cas n° : 63-340



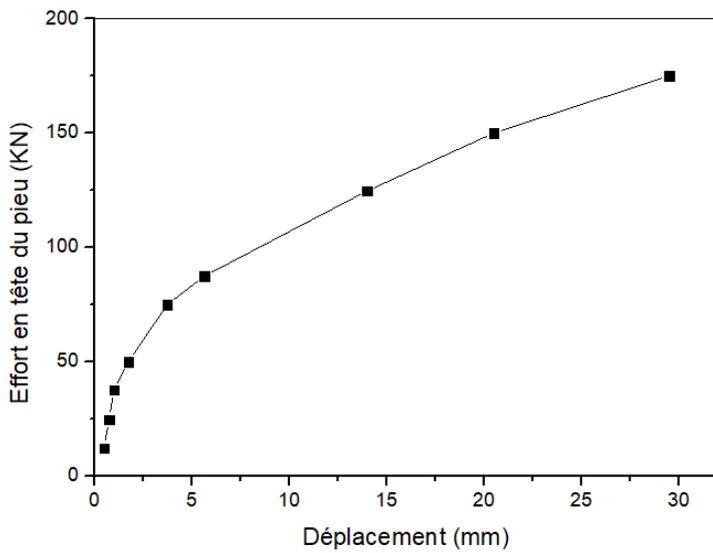
Courbe de chargement cas n° : 64-340



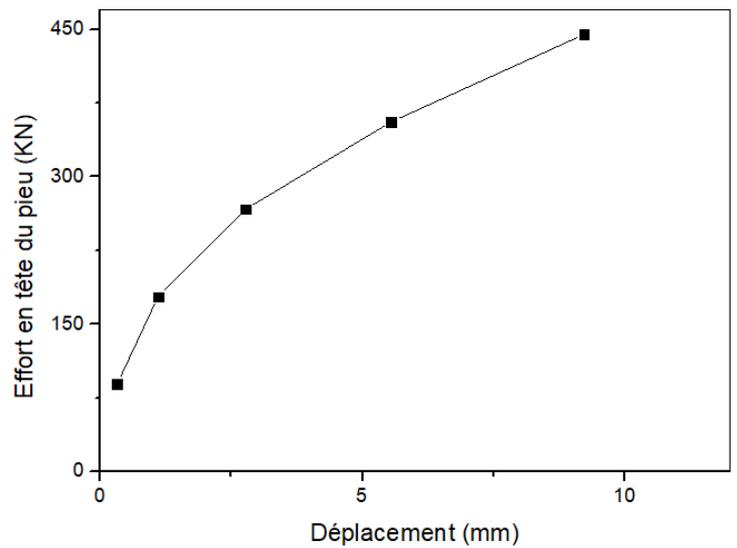
Courbe de chargement cas n° : 65-340



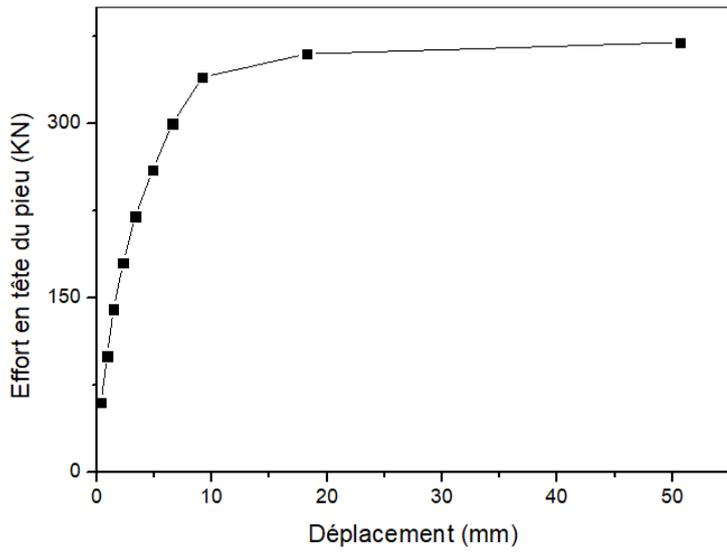
Courbe de chargement cas n°: 66-340



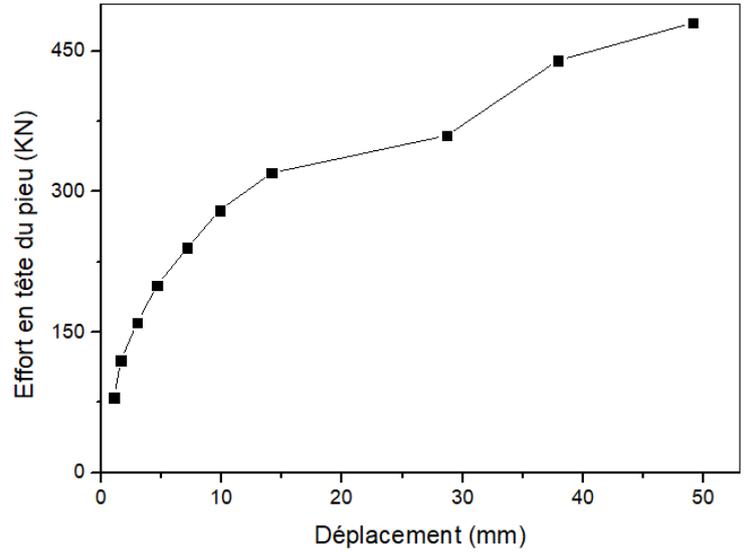
Courbe de chargement cas n° : 67-879



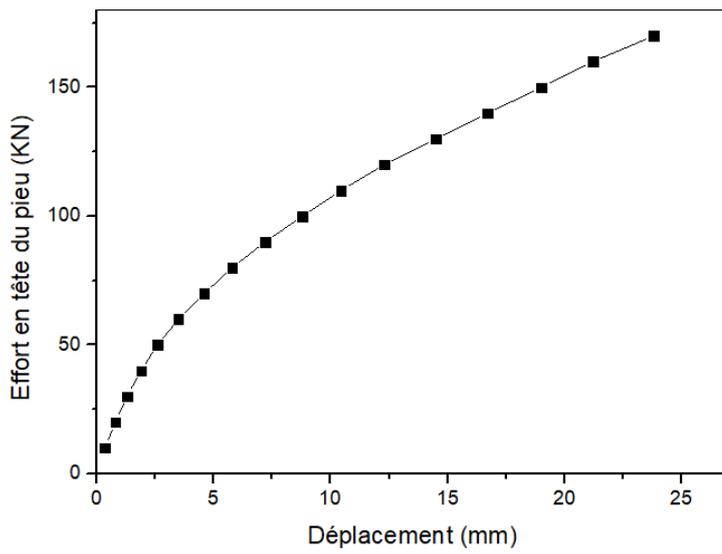
Courbe de chargement cas n° : 68-876



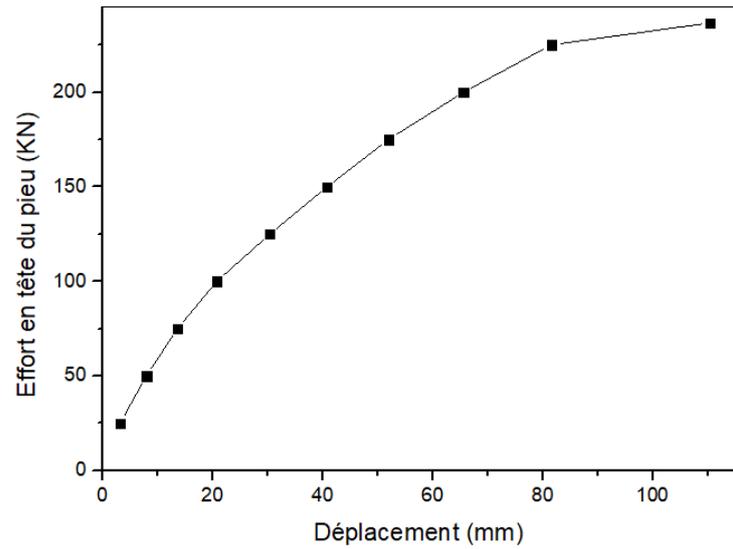
Courbe de chargement cas n° : 69-756



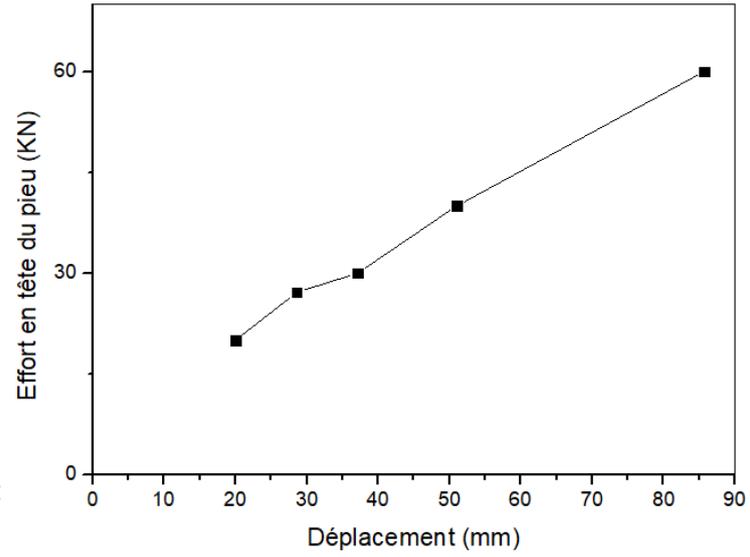
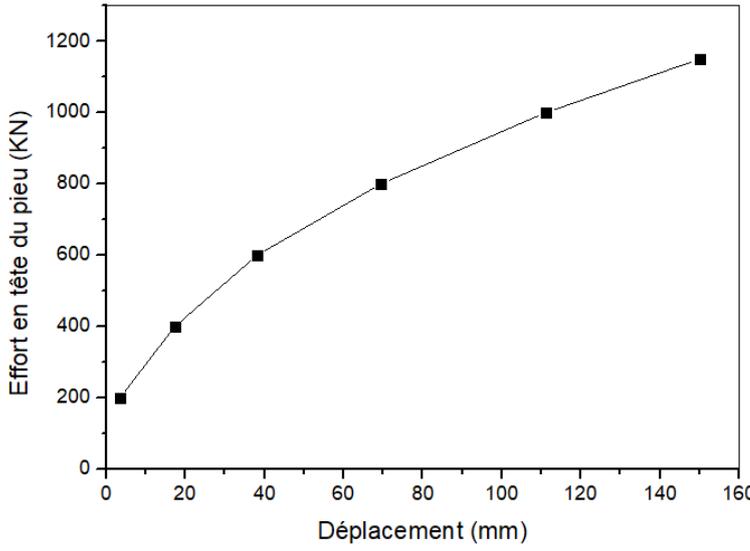
Courbe de chargement cas n° : 70-756



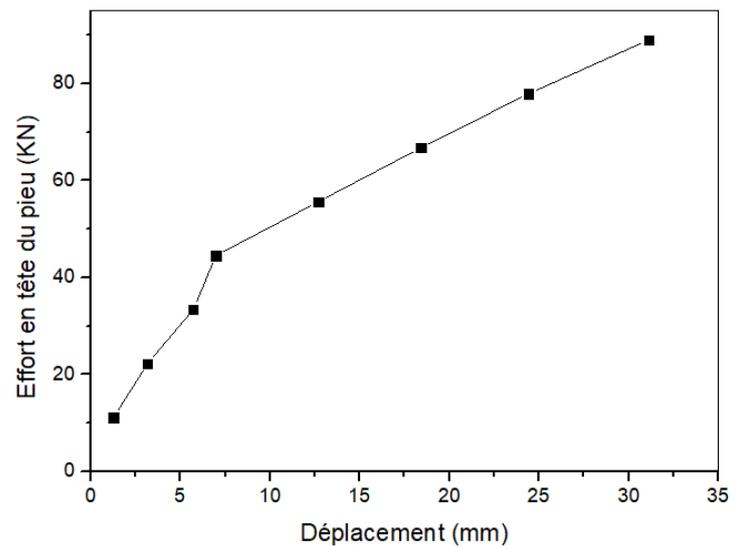
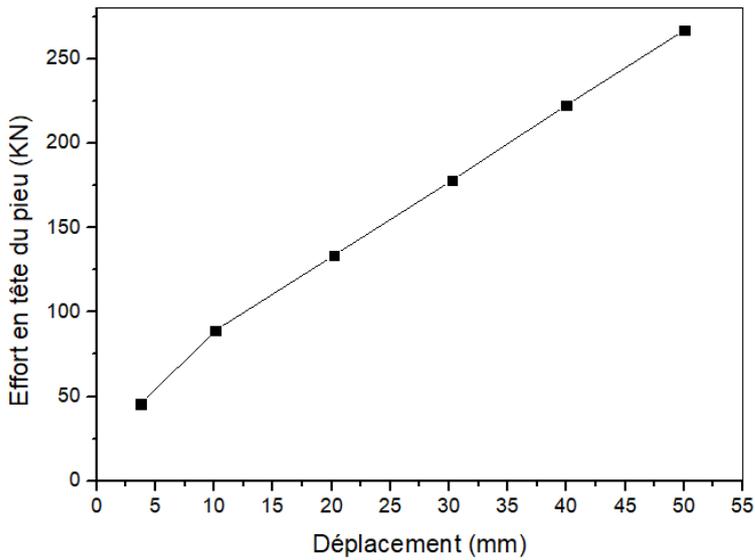
Courbe de chargement cas n° : 78-631



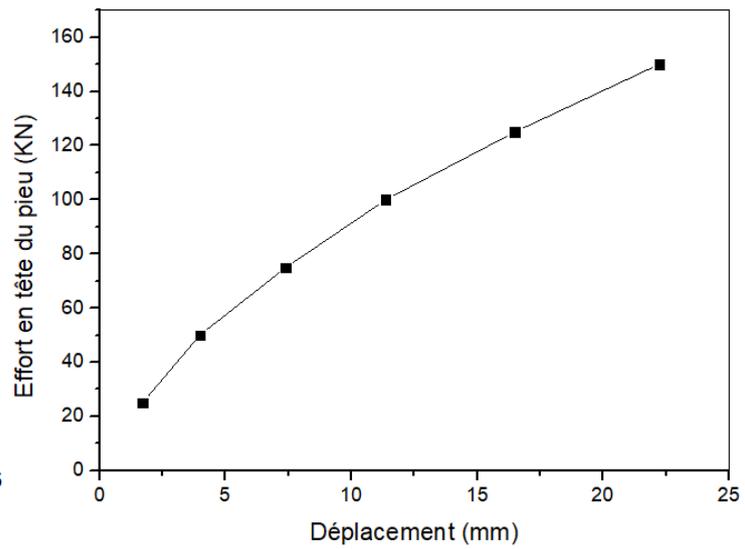
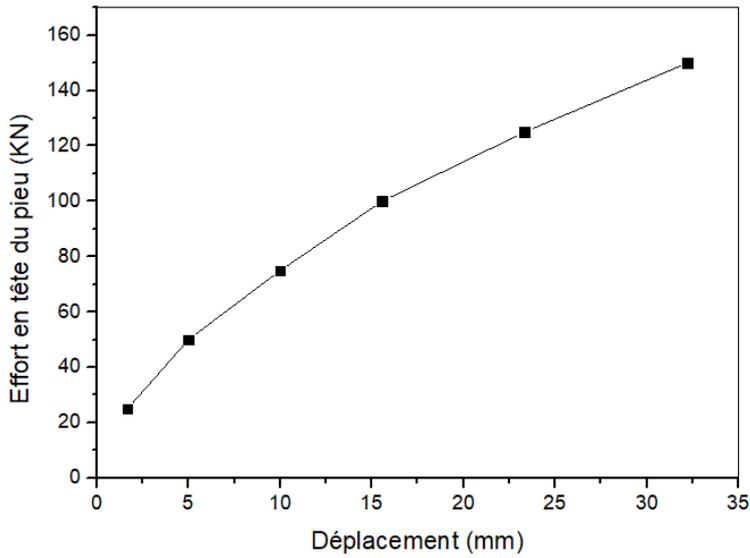
Courbe de chargement cas n° : 80-931



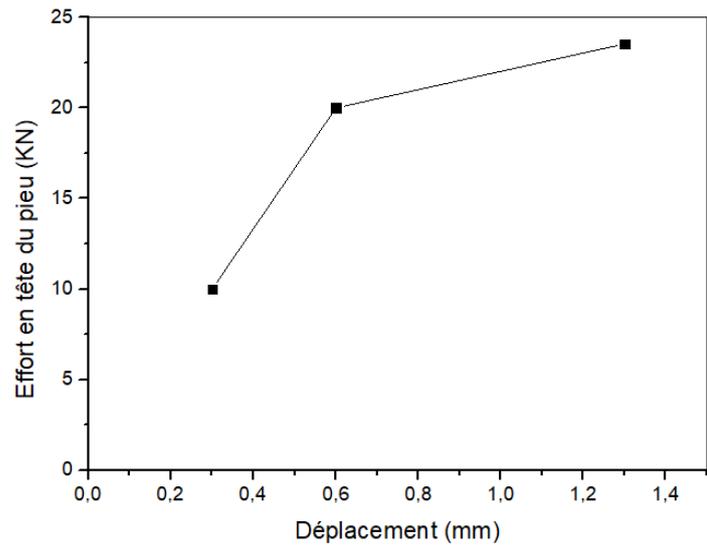
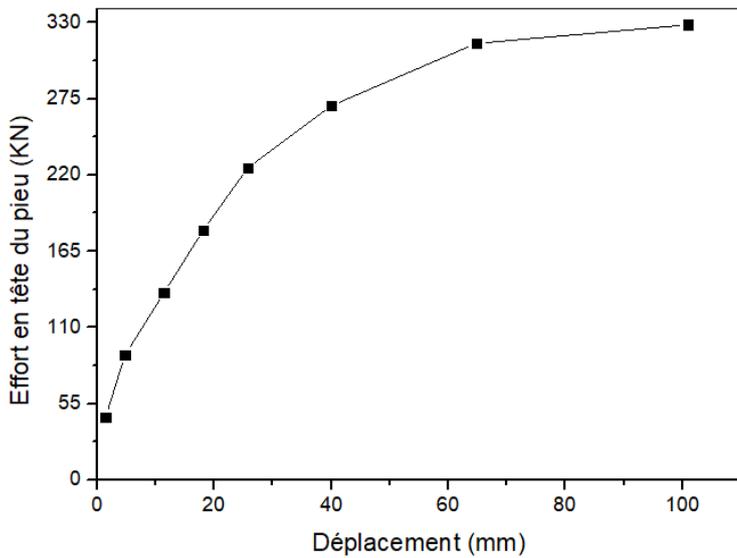
Courbe de chargement cas n° : 112-755 Courbe de chargement cas n° : 127-573



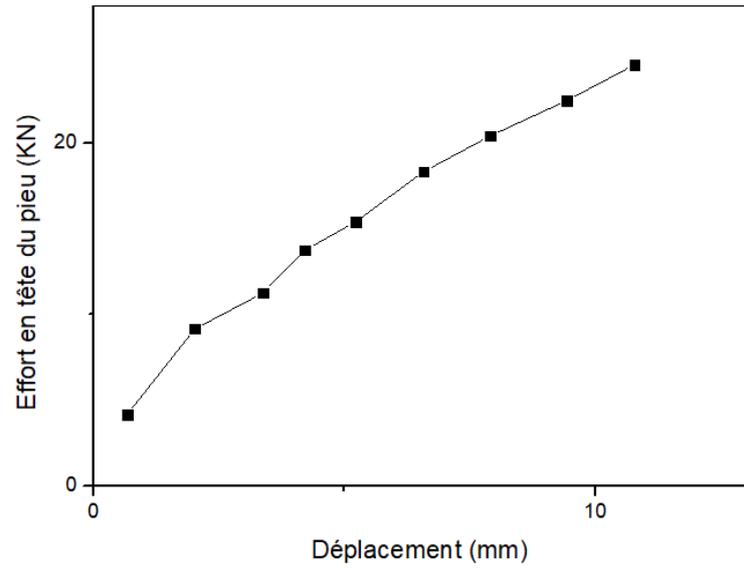
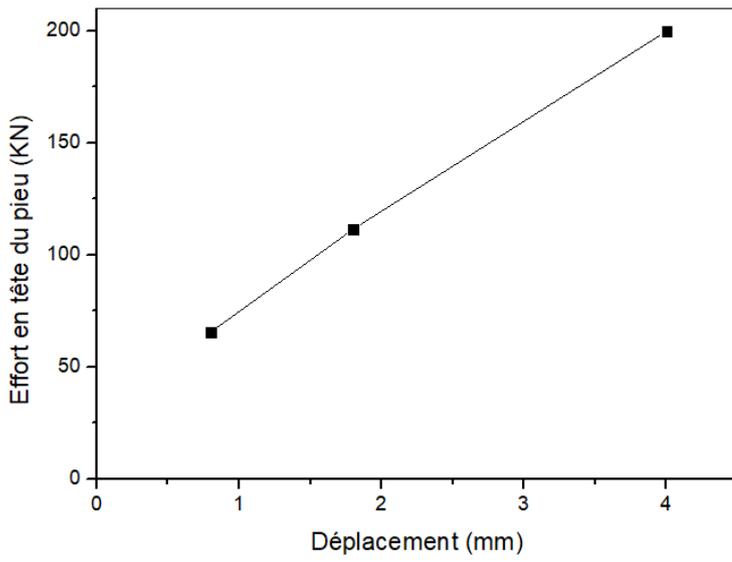
Courbe de chargement cas n° : 129-41 Courbe de chargement cas n° : 134-283



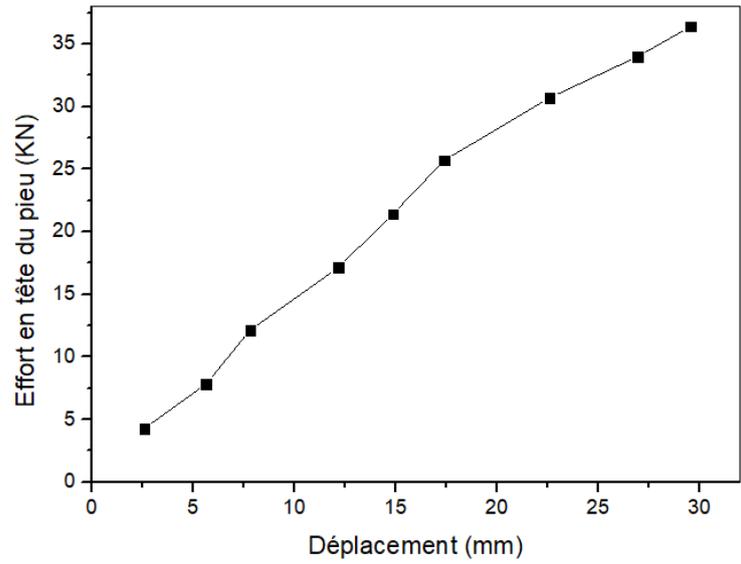
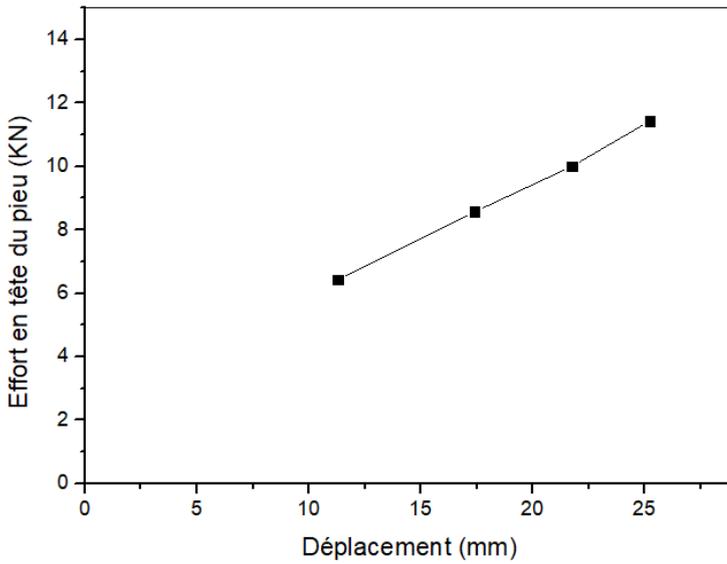
Courbe de chargement cas n° : 135-755 Courbe de chargement cas n° : 136-755



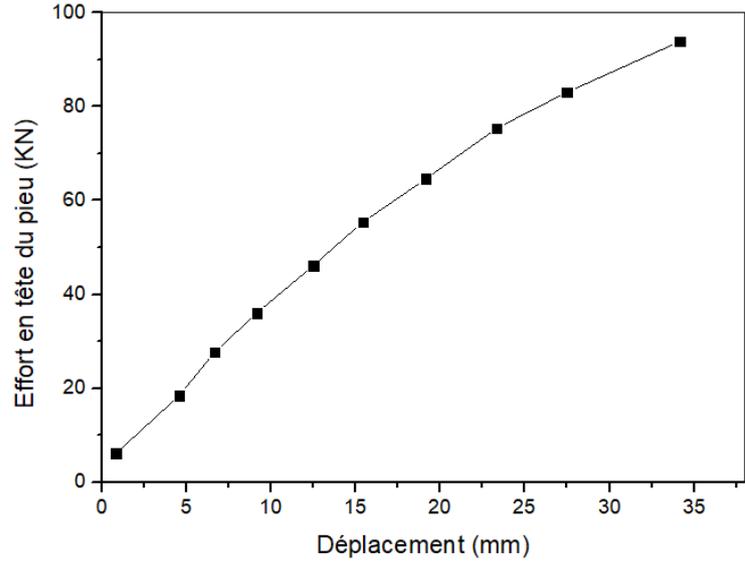
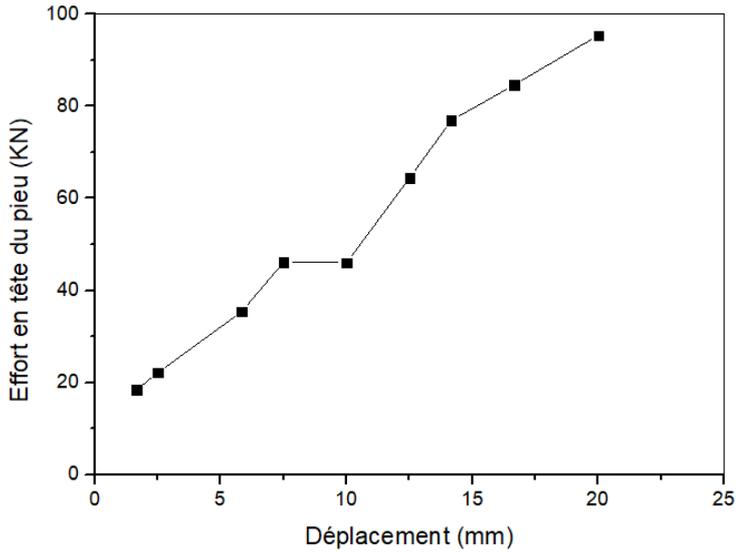
Courbe de chargement cas n° : 137-755 Courbe de chargement cas n° : 138-1261



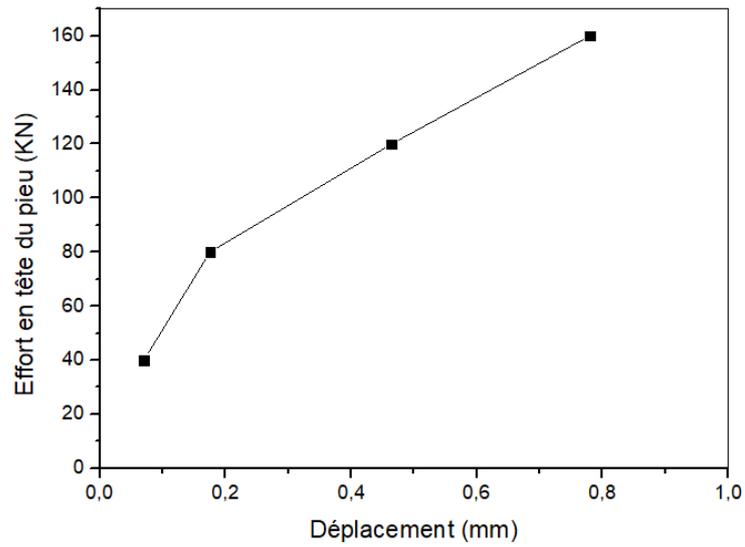
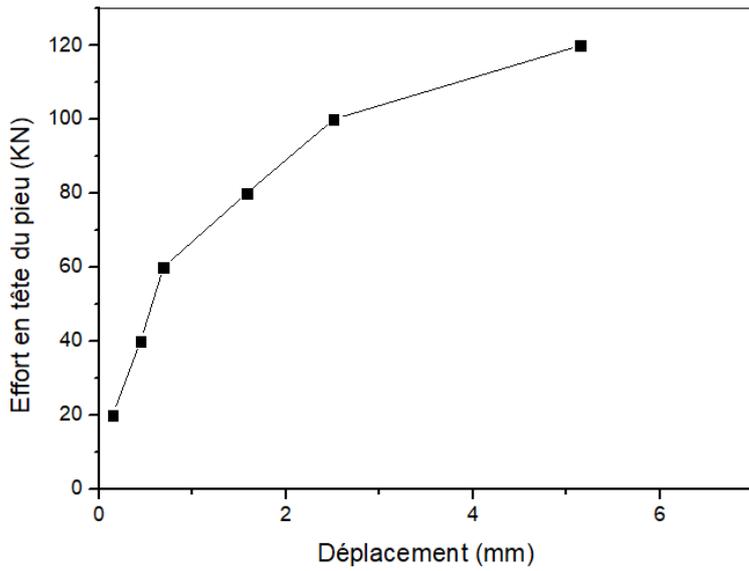
Courbe de chargement cas n° : 139-512 **Courbe de chargement cas n° : 143-614**



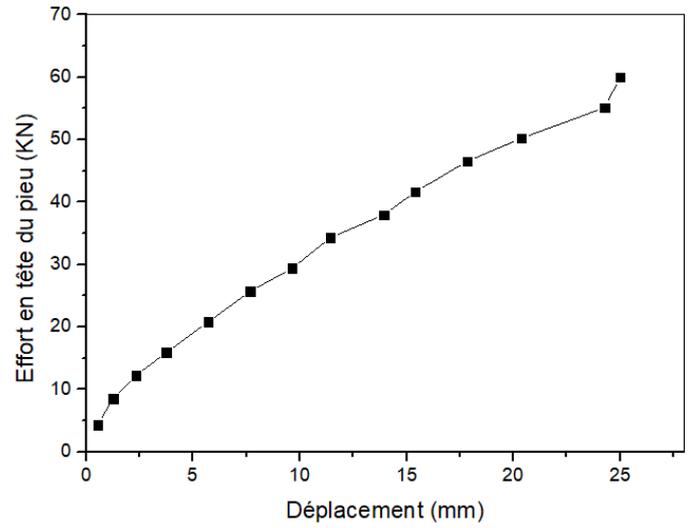
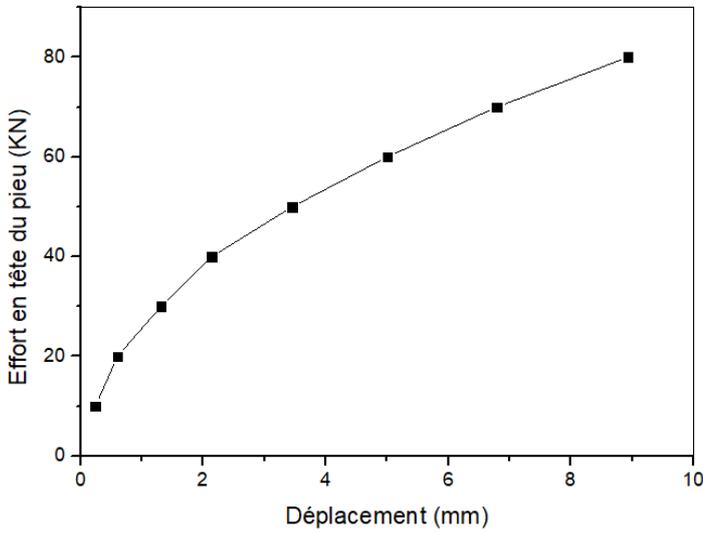
Courbe de chargement cas n° : 148-851 **Courbe de chargement cas n° : 149-851**



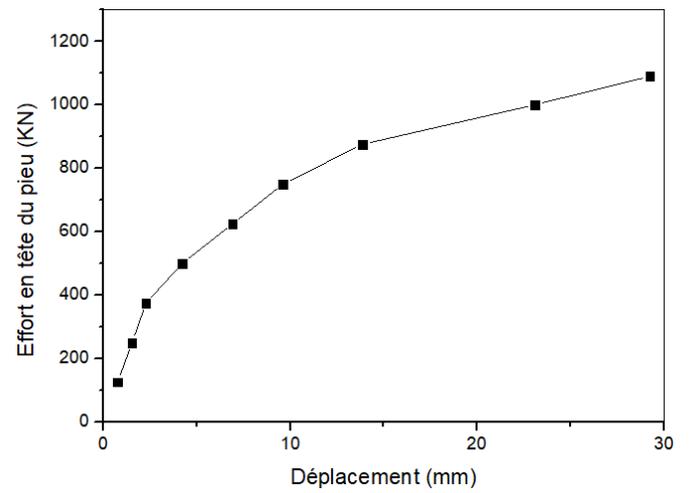
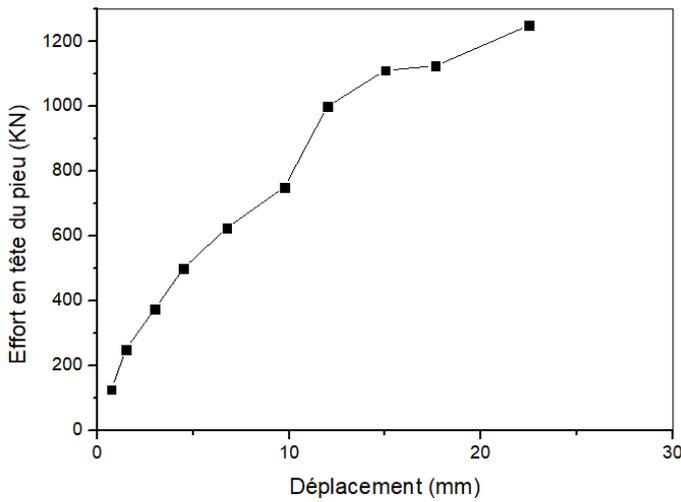
Courbe de chargement cas n° : 150-851 Courbe de chargement cas n° : 151-851



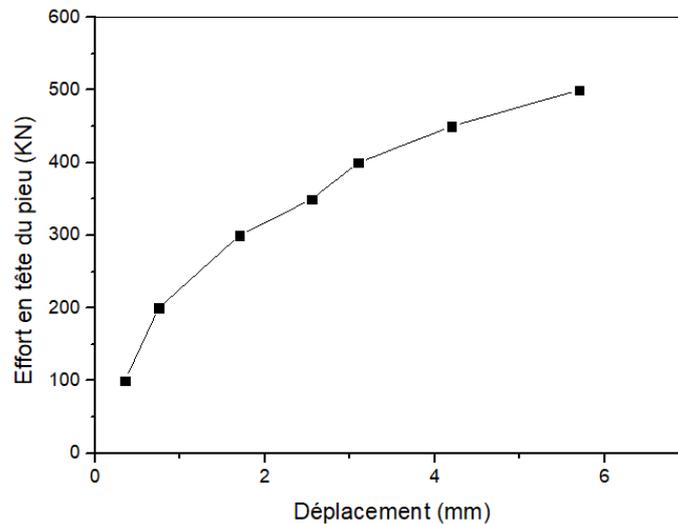
Courbe de chargement cas n° : 152-756 Courbe de chargement cas n° : 153-756



Courbe de chargement cas n° : 154-631 Courbe de chargement cas n° : 157-2000

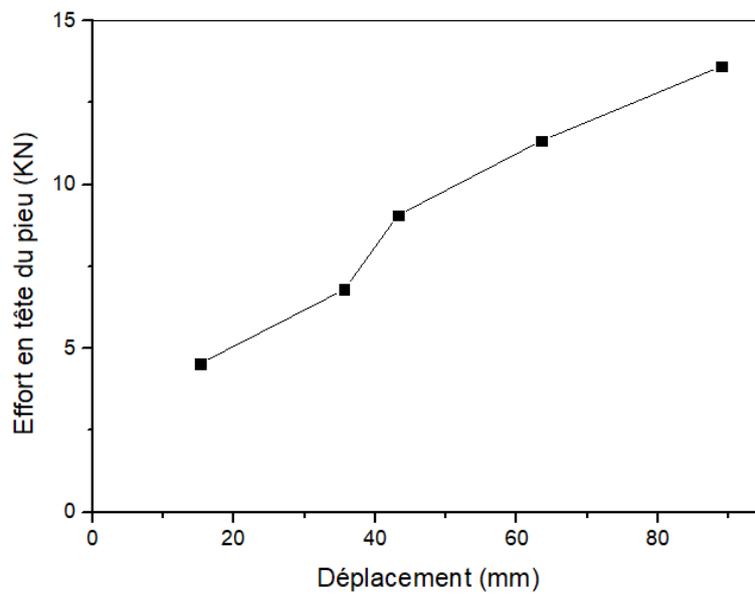


Courbe de chargement cas n° : 166-317 Courbe de chargement cas n° : 167-1317

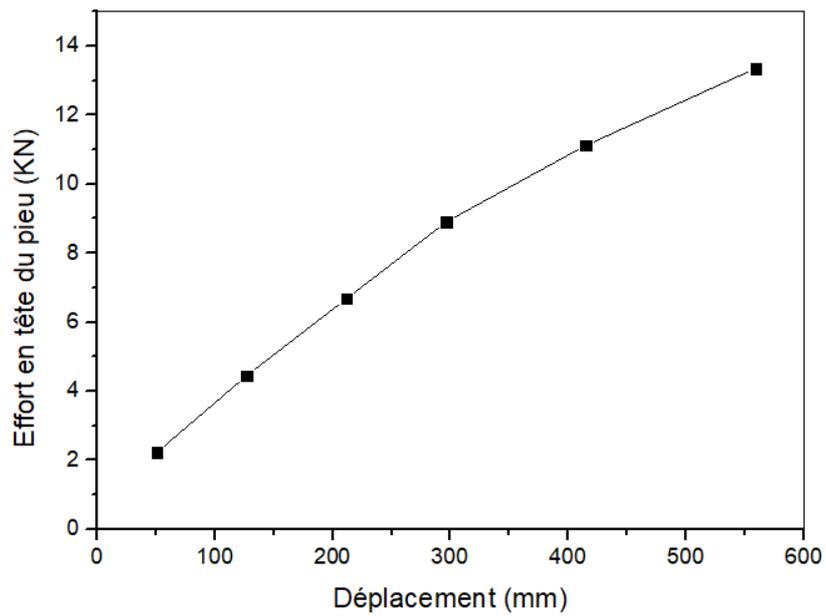


Courbe de chargement cas n° : 169-1

Sols limoneux



Courbe de chargement cas n° : 28-403



Courbe de chargement cas n° : 132-283