

École polytechnique de Louvain

Effets des anomalies géométriques et matérielles sur le comportement statique des pieux coulés en place

Auteurs : **Marine Benoit**
Promoteur : **Luca Sgambi**
Lecteurs : **Mohamed Ansriou, Catherine Doneux, Julien Geno**
Année académique 2019–2020
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon promoteur, Monsieur Mohamed ANSRIOU, pour ses conseils et sa confiance en moi pour étudier certaines problématiques liées à sa thèse de doctorat.

Je désire aussi remercier Monsieur Luca SGAMBI pour avoir repris le mémoire au début d'année en tant que promoteur ainsi que pour sa disponibilité.

Je tiens à remercier Monsieur Mustafa JAFARI pour son partage de connaissance sur le logiciel Plaxis 2D.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes amis et ma famille qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de l'année. Et spécialement à Marie VANDAMME qui m'a soutenue et motivée pour travailler lors des longues semaines de confinement.

Enfin, je terminerai par remercier mes parents qui ont toujours été présents pour moi. Merci de m'avoir donné toutes les cartes en main pour mon futur et de m'avoir permis de faire des études.

Résumé

Les tests de performance étant plus coûteux que les tests d'intégrité, il est économiquement intéressant de pouvoir déterminer la performance d'un pieu défectueux à partir de la géométrie et de la position des anomalies pouvant se former dans celui-ci. L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'impact des anomalies géométriques et matérielles sur la performance du pieu. Pour nous aider dans notre travail, nous avons d'abord défini une anomalie, les différents types existants, la manière dont celles-ci peuvent se former et les différents tests d'intégrité permettant de les détecter. H.G. Poulos avait déjà étudié le comportement des pieux défectueux en 1995, sans expliquer son raisonnement en détails. Nous avons souhaité reproduire son modèle en développant une approche modélisant le pieu par une série de ressorts. Nous avons été plus loin dans la réflexion en analysant la forme, la position et l'empreinte de l'anomalie ainsi que la présence possible d'un effet de base supplémentaire au droit de l'anomalie géométrique. Pour se rapprocher du comportement réel du pieu, un modèle Plaxis 2D est créé sur base des hypothèses de K. Petek, C.W. Felice et R.D. Holtz de 2002. Trois cas sont étudiés : le sol et le béton ont un comportement élastique linéaire ; le sol a un comportement Mohr-Coulomb et le béton en comportement élastique linéaire ; le sol et béton ont un comportement Mohr-Coulomb. Les résultats obtenus pour le premier cas suivant l'approche en éléments finis coïncident avec l'approche ressorts. Pour les deux autres cas, les conclusions tirées des résultats sont les mêmes que le premier cas mais l'allure des résultats est différente. Une striction du fût diminuera la rigidité de la tête de pieu tandis qu'une extension l'augmentera. Une anomalie proche de la tête de pieu réduira davantage la rigidité que si elle était formée en profondeur. Une empreinte plus grande diminue la rigidité en cas de striction mais l'augmente avec une extension. Une anomalie de forme rectangulaire est néfaste, la forme triangulaire est la moins pénalisante et l'ellipse se situe entre les deux.

Abstract

The performance tests being less cost efficient than the integrity test, it becomes financially interesting to evaluate the performance of a defective pile knowing its geometry and the position of the anomalies that may occur. The goal of this thesis is to analyze the impact of the geometrical and material anomalies on the performance of the pile. To help us achieve our goal, we have first defined the anomaly then the different existing types, how they form and the different integrity test to figure out their position. H.G. Poulos had already study the behavior of defective piles in 1995 without explaining his method in detail. Our will was to reproduce his model developing an approach representing the pile using a series of springs. Going further into our reflection we decided to analyze the shape, position, footprint of the anomaly and the chance of a supplementary base emerging into the anomaly. To get as close to the real behavior of the pile, we created a Plaxis 2D model based on assumptions made by K. Petek, C.W. Felice et R.D. Holtz in 2002. Three cases have been studied : the soil and concrete having a linear elastic behavior; the soil having a Mohr-Coulomb behavior and the concrete having a linear elastic behavior; the soil and the concrete having a Mohr-Coulomb behavior. The results obtained for the first case in FEM correlated with the approach representing the pile using a series of springs. For the two other cases, the conclusions are the same as the first case but the results' look are different. A necking of the shaft will lower the rigidity of the head of the pile whereas a bulge increase the rigidity. The highest the anomaly forms on the pile the more it will lower the rigidity of the pile. If the anomaly has a bigger footprint, the rigidity will increase in case of a bulge whereas it will decrease in case of a necking. An anomaly of a rectangular shape has the biggest effect on the pile behavior and the triangular shaped anomaly affects the pile behavior the less. The elliptical shaped anomaly lays in between in term of effect caused to the pile.

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
RÉSUMÉ	4
ABSTRACT	4
TABLE DES MATIÈRES	6
INTRODUCTION.....	8
PRÉLIMINAIRE	10
1.1 DÉFINITION D'UNE ANOMALIE	10
1.2 PERFORMANCE ET INTÉGRITÉ	11
1.2.1 <i>Mesure d'intégrité du pieu</i>	11
1.2.2 <i>Mesure de performance du pieu</i>	15
1.2.3 <i>Relation entre l'intégrité et la performance d'un pieu</i>	16
1.3 LES DIFFÉRENTS TYPES D'ANOMALIES DES PIEUX	16
1.3.1 <i>Anomalies d'interfaces</i>	17
1.3.2 <i>Anomalies géométriques</i>	17
1.3.3 <i>Anomalies matérielles</i>	17
1.4 FORMATION DES ANOMALIES	18
1.4.1 <i>Activités de construction à proximité des pieux</i>	18
1.4.2 <i>Recépage des pieux</i>	18
1.4.3 <i>Couche compressive</i>	19
1.4.4 <i>Praticabilité du béton</i>	19
1.4.5 <i>Chute incontrôlée du béton</i>	20
1.4.6 <i>Chute de sol dans le trou foré</i>	20
1.4.7 <i>Effets thermiques</i>	21
1.4.8 <i>Effets hydrauliques</i>	21
1.5 MODÉLISATION DES ANOMALIES DANS LA LITTÉRATURE	22
1.5.1 <i>Poulos</i>	22
1.5.2 <i>Les pieux forés : Petek ; Holtz ; Conrad</i>	25
1.6 CONCLUSION	27
APPROCHE PAR RESSORTS	28
2.1 MODÉLISATION DE L'ANOMALIE.....	28
2.2 ELABORATION DU MODÈLE	29
2.2.1 <i>Données</i>	31
2.2.2 <i>Résultats</i>	32
2.3 DISCUSSION F_{SI}	34
2.4 VARIATION DE LA FORME DE L'ANOMALIE	34
2.4.1 <i>Forme rectangulaire</i>	35
2.4.2 <i>Forme triangulaire</i>	36
2.4.3 <i>Forme elliptique</i>	37
2.4.4 <i>Résultats</i>	39
2.5 AJOUT D'UNE BASE SUPPLÉMENTAIRE AU NIVEAU DU L'ANOMALIE	40
2.5.1 <i>Résultats</i>	44
2.6 VARIATION DE LA POSITION DE L'ANOMALIE	45
2.6.1 <i>Résultats</i>	45
2.7 VARIATION DE L'EMPREINTE DE L'ANOMALIE	47
2.7.1 <i>Résultats</i>	48
2.8 PIEU TAPERED	50
2.9 ANOMALIE MATÉRIELLE.....	51

SIMULATIONS NUMÉRIQUES	52
3.1 DONNÉES.....	52
3.2 ELABORATION DU MODÈLE	53
3.2.1 <i>Sol</i>	54
3.2.2 <i>Structure</i>	54
3.2.3 <i>Maillage</i>	56
3.2.4 <i>Conditions d'écoulement</i>	57
3.2.5 <i>Construction par étapes</i>	58
3.2.6 <i>Output</i>	59
3.3 CAS 1 : SOL ET BÉTON EN ÉLASTIQUE LINÉAIRE.....	61
3.3.1 <i>Résultats</i>	61
3.3.2 <i>Comparaison avec le modèle à ressorts</i>	66
3.4 CAS 2 : SOL EN MOHR-COULOMB ET BÉTON EN ÉLASTIQUE LINÉAIRE	68
3.4.1 <i>Résultats</i>	69
3.4.2 <i>Type de pieu</i>	72
3.5 CAS 3 : SOL ET BÉTON EN MOHR-COULOMB.....	72
3.5.1 <i>Problème non-associé</i>	73
3.5.2 <i>Résultats</i>	76
3.5.3 <i>Type de pieu</i>	80
CONCLUSION	82
BIBLIOGRAPHIE	84
TABLE DES FIGURES	86
LISTE DES TABLEAUX	90
TABLE DES SYMBOLES	92
ANNEXES	94
ANNEXE A.....	94
ANNEXE B.....	97
ANNEXE C.....	100
ANNEXE D.....	103
ANNEXE E.....	106

Introduction

Les fondations d'un bâtiment transfèrent la charge verticale de la superstructure au sol. C'est donc un élément primordial pour la stabilité et le fonctionnement de la structure. Cependant le sol n'est pas toujours de bonne qualité et il est parfois nécessaire d'aller chercher la stabilité en profondeur. C'est là qu'interviennent les fondations profondes. Plusieurs techniques de construction existent mais la plus utilisée en Belgique est le pieu coulé en place.

Le principe de cette technique est que le coffrage du pieu est formé par le sol. Mais celui-ci n'est pas statique et il risque d'affecter la géométrie du pieu ou la résistance du béton. Ces fondations sont donc susceptibles de développer des anomalies le long de leur fût.

Une anomalie est définie comme une imperfection qui, en fonction de sa géométrie et de sa position, va avoir une incidence sur la charge que peut reprendre le pieu. Son comportement est donc différent de celui supposé théoriquement. Les anomalies se formant sous la surface du sol, elles sont localisables et mesurables à partir de tests déterminant l'intégrité du pieu. L'intégrité du pieu c'est la mesure de la présence ou de l'absence d'anomalies. Différentes anomalies existent mais seulement deux sont étudiées dans ce travail, l'anomalie matérielle où la résistance du béton est réduite et l'anomalie géométrique où la forme du pieu est modifiée. Plusieurs causes peuvent être à l'origine des anomalies : un manque de savoir-faire et de connaissances, les matériaux comme le sol ou le béton ou encore l'environnement du pieu. Leurs conséquences affectent dès lors la capacité portante des pieux.

Cependant les tests d'intégrité ne permettent pas de connaître la portance d'un pieu et donc de prendre les mesures nécessaires. Des essais plus coûteux sont alors effectués pour mesurer la performance. La performance d'un pieu est définie comme étant sa capacité à transférer des charges au sol en limitant sa propre déformation.

Pour connaître avec précision la qualité d'un pieu, des tests d'intégrités et de performances doivent être réalisés. Cependant autant de tests peuvent vite devenir onéreux. Les tests les moins coûteux sont les essais d'intégrités qui seront donc privilégiés. C'est pourtant la performance du pieu qui permet de savoir avec précision si le pieu sera capable de reprendre les charges de la superstructure.

L'objectif de ce mémoire est d'observer l'impact de la géométrie et de la localisation de l'anomalie sur la capacité portante du pieu afin d'évaluer la performance du pieu à partir de son intégrité.

Dans la première partie du travail, nous verrons dans un premier temps les différentes méthodes permettant de mesurer la performance et l'intégrité d'un pieu. Ensuite, nous aborderons les anomalies existantes ainsi que les manières dont elles peuvent se former. Et pour finir, nous nous intéresserons à la modélisation des anomalies dans des articles existants.

Dans la partie suivante, nous tenterons de retomber sur les résultats d'un article sur le comportement des pieux défectueux écrit par Poulos. Le modèle ainsi créé nous permettra d'aller plus loin dans la réflexion.

Dans la dernière partie, les anomalies seront modélisées avec un logiciel d'éléments finis. Plusieurs modèles seront conçus avant de finalement étudier l'impact des anomalies sur un modèle reproduisant le comportement réel d'un pieu défectueux.

Pour finir, des conclusions seront tirées des résultats obtenus.

Préliminaire

En Belgique, la plupart des fondations profondes sont des pieux coulés en place. Ces types de fondations sont susceptibles de développer les anomalies sur la longueur du pieu. Plusieurs causes peuvent expliquer une anomalie comme un manque dans l'expérience et la supervision des travaux ainsi que les conditions géotechniques.

Certaines précautions peuvent être prises lors de la réalisation comme l'enregistrement des paramètres de forage ou après l'exécution avec des contrôles de qualité. Ceux-ci se distinguent en deux catégories, l'évaluation de l'intégrité et de la performance des pieux.

1.1 Définition d'une anomalie

Lorsqu'un pieu présente un comportement différent de celui normalement considéré, la fondation comporte une anomalie. Le pieu peut toujours être exploité mais il ne respecte pas une des conditions suivantes :

- L'Etat limite de service : la fondation ne doit pas tasser plus que ce qui est accepté par la superstructure lorsqu'elle est soumise par la charge de travail définie.
- L'Etat limite ultime : la fondation doit pouvoir supporter une charge avec un certain coefficient de sécurité pour éviter la rupture.
- La durabilité : la fondation doit être insensible aux activités temporelles comme les attaques chimiques ou la corrosion des armatures afin de satisfaire la durée de vie de la structure.

Les deux premières conditions concernent la performance du pieu tandis que la dernière concerne l'intégrité de celui-ci. Un dommage résultant du manque de performance et d'intégrité est néfaste pour la superstructure.

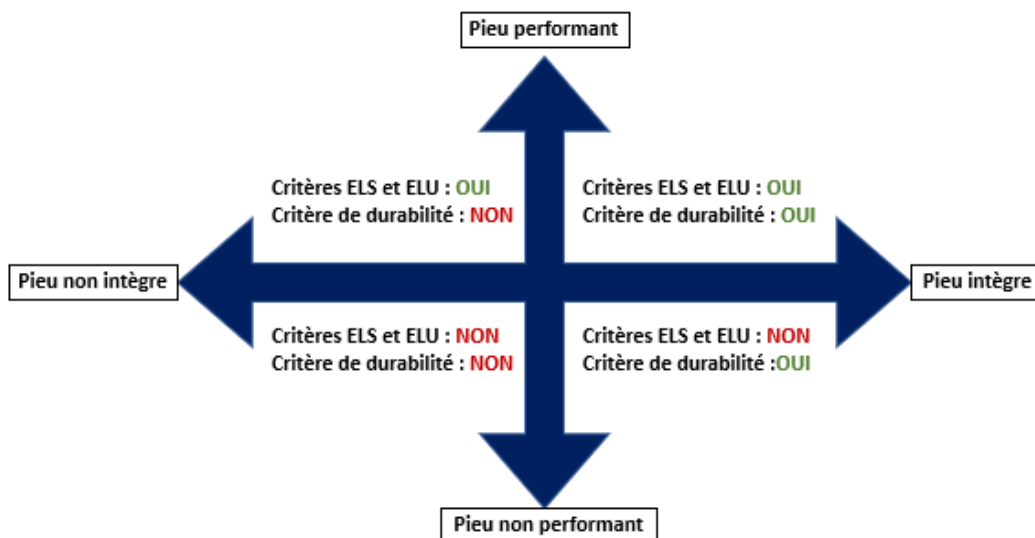


Figure 1 : Anomalie d'un pieu

1.2 Performance et intégrité

L'absence d'anomalies définit la qualité d'un pieu. Il existe 2 moments à laquelle la contrôler. Le premier consiste à surveiller les paramètres de forage tel que la profondeur, le couple de rotation, la vitesse d'avancement, ... lors de la mise en œuvre des pieux. Leur enregistrement via un système Lutz¹ permet de corriger directement l'exécution en cas d'anomalie. Le second est l'ensemble des tests s'effectuant après l'exécution. Ils peuvent soit mesurer la performance du pieu soit son intégrité.

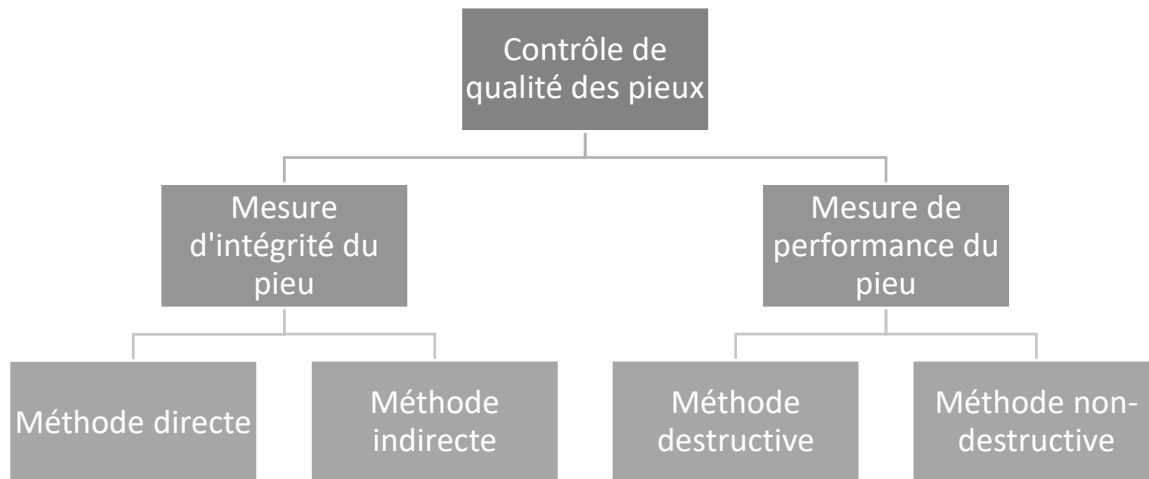


Figure 2 : Méthodes de contrôle de la qualité des pieux

1.2.1 Mesure d'intégrité du pieu

1.2.1.1 Indirectes

Les méthodes d'intégrités indirectes consistent à mesurer les variations de valeurs physiques afin de déterminer la qualité du pieu, la longueur de celui-ci, la localisation de l'anomalie.... Cependant elles ne permettent pas d'identifier la nature de cette dernière.

1.2.1.1.1 Test d'intégrité sonique

Le test consiste à générer une onde mécanique en appliquant un coup de marteau en tête de pieu. L'onde va se transmettre dans la fondation et se refléter lorsqu'elle rencontre des discontinuités. Un accéléromètre placé en tête de pieu mesure ces ondes réfléchies et il est possible d'analyser les données obtenues afin de détecter les anomalies et de déterminer la longueur du pieu.

¹ Appareil de mesure et de pilotage permettant de superviser le déroulement du chantier en temps réel en vérifiant les paramètres et en contrôlant la qualité du travail en cours grâce à l'aperçu de l'écran de l'opérateur.

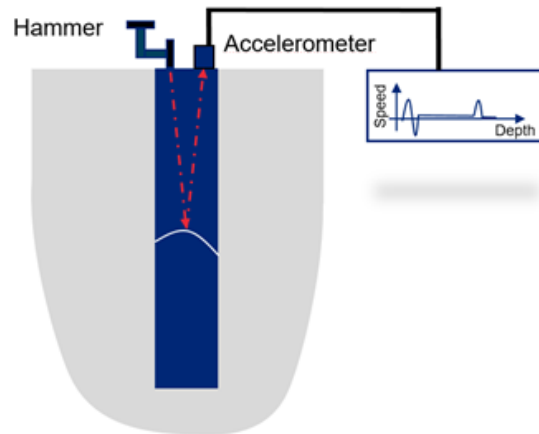


Figure 3 : Test d'intégrité sonique (1)

1.2.1.1.2 Enregistrement sonique

- A trous croisés : lors de l'exécution du pieu, minimum deux tubes de réservations verticaux y sont prévus. Après durcissement du béton, un émetteur est introduit dans un de ces tubes et une onde ultrasonore y est émise. Le récepteur, situé à la même profondeur dans l'autre tube, permettra de connaître la qualité du béton à partir du temps de propagation de l'onde tandis qu'une singularité sera localisée par une variation d'amplitude. Plusieurs mesures sont effectuées à différentes profondeurs afin d'ausculter toute la hauteur du pieu.

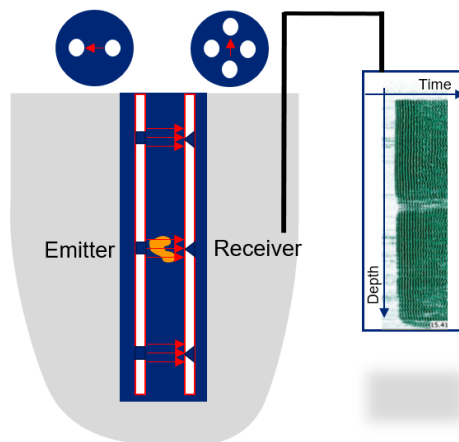


Figure 4 : Enregistrement sonique à trous croisés (1)

- A un seul trou : un seul tube de réservation est prévu au centre du pieu contrairement au test précédent. L'émetteur et le récepteur sont alors descendus dans le même tube avec une certaine distance et l'onde se propage verticalement. Plusieurs mesures sont réalisées en les descendant au fur et à mesure.

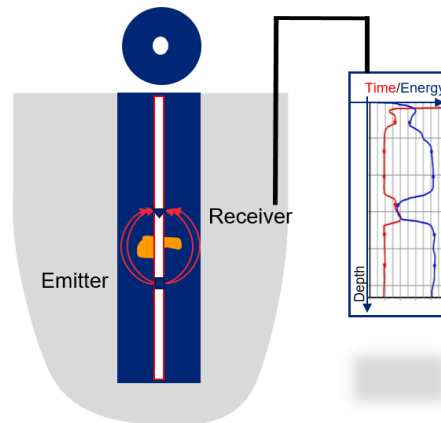


Figure 5 : Enregistrement sonique à un seul trou (1)

1.2.1.1.3 Test sismique parallèle

Ce test est réalisé sur une fondation profonde existante et ne contenant pas de tube de réservation. Il s'agit d'une variante de l'enregistrement sonique décrit précédemment. Un forage est réalisé contigu à la fondation dans lequel une sonde réceptrice est déplacée sur toute la hauteur. Une onde sera créée par la production de chocs répétés en tête de fondation via un marteau. Le temps de parcours est ensuite analysé afin de déterminer la longueur du pieu et de localiser les anomalies.

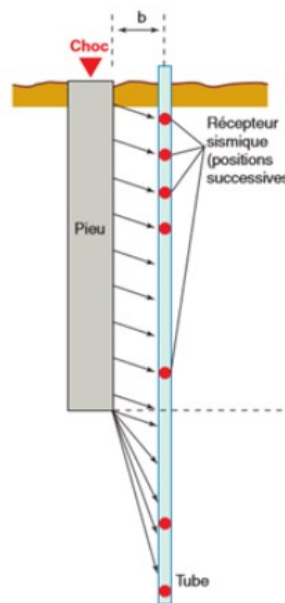


Figure 6 : Test sismique parallèle (2)

1.2.1.1.4 Diffusion de rayons Gamma

Un tube de réservation permet d'y insérer une sonde. En bas de celle-ci se trouve une source radioactive émettant des rayons Gamma et un détecteur placé en haut de la sonde les capte. Leurs trajets indiquent la variation de la masse volumique du béton et donc sa qualité (1).

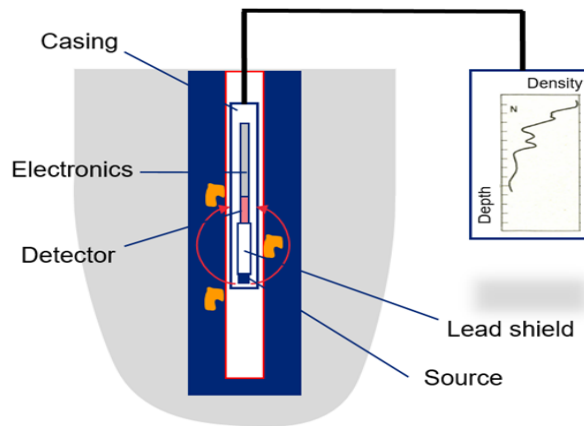


Figure 7 : Diffusion de rayons Gamma (1)

1.2.1.1.5 Profil d'intégrité thermique

- Par sonde : une sonde thermique est insérée dans un tube de réservation. Elle est équipée de capteurs infrarouges radiaux mesurant la chaleur générée par l'hydratation du ciment. Les données mettent en évidence la qualité du béton ainsi que les anomalies possibles.

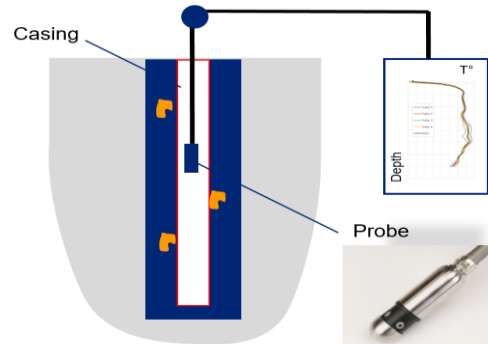


Figure 8 : Profil d'intégrité thermique par sonde (1)

- Par câbles : des câbles thermiques sont liés à la cage d'armature. Des capteurs y sont également attachés et couvrent toute la hauteur du pieu. La température est continuellement mesurée afin de localiser les anomalies et d'estimer la qualité du béton.

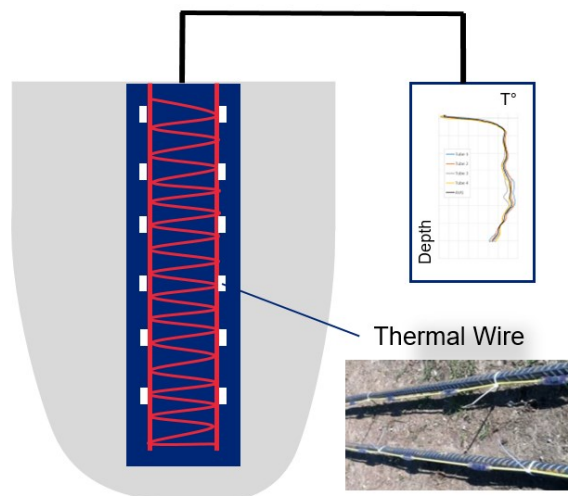


Figure 9 : Profil d'intégrité thermique par câbles (1)

1.2.1.2 Directes

La seule méthode directe est le carottage. Elle consiste à prélever un échantillon du matériau constitutif du pieu pour réaliser des essais en laboratoire. Le carottage est considéré comme destructif mais il permet d'exploiter le trou de forage pour des examens visuels ou des méthodes d'intégrités indirectes.

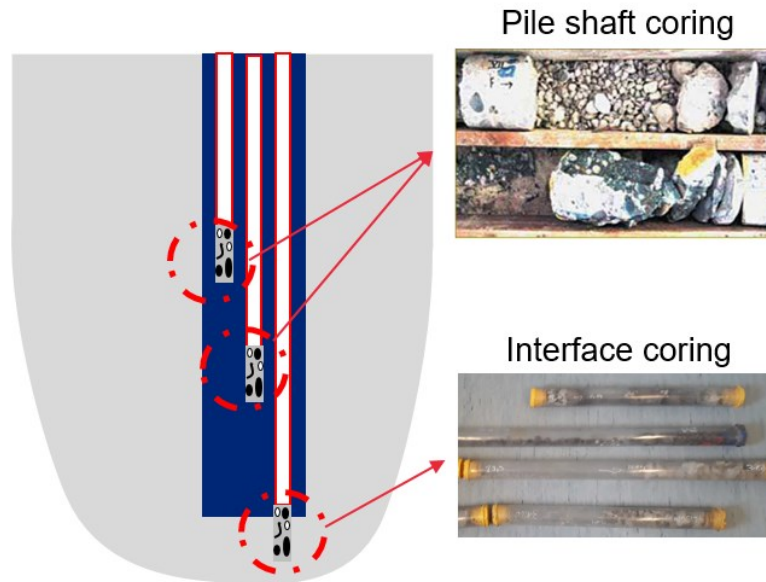


Figure 10 : Carottage (1)

1.2.2 Mesure de performance du pieu

Les méthodes mesurant la performance d'un pieu permettent de déterminer sa capacité portante. Cependant elles ne peuvent pas vérifier l'intégrité de la fondation ainsi que la présence d'anomalies.

1.2.2.1 Destructives

L'essai de chargement statique consiste à mesurer l'enfoncement du pieu afin d'obtenir la courbe de charge-déplacement. Un premier capteur mesure la force appliquée en tête de pieu et un second enregistre le tassement.

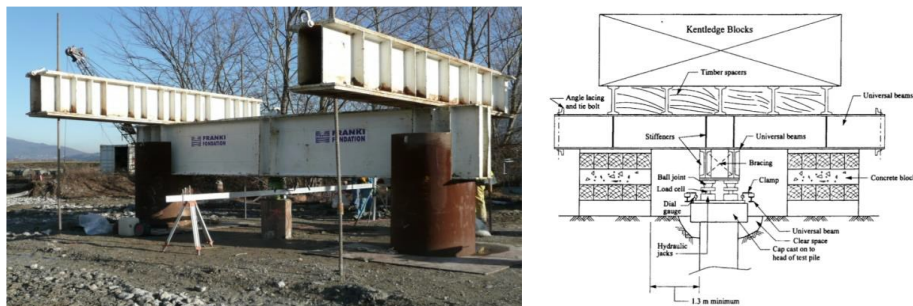


Figure 11 : Essai de chargement statique (3)

1.2.2.2 Non-destructives

L'essai de chargement dynamique est une méthode non-destructive consistant à appliquer un coup en tête de pieu pour obtenir la courbe de charge-déplacement. Celle-ci sera ensuite corrigée à l'aide de la vitesse du coup porté.



Figure 12 : Essai de chargement dynamique (3)

L'essai statique permet également d'obtenir cette courbe de charge-déplacement à condition de ne pas atteindre la rupture lors du chargement.

1.2.3 Relation entre l'intégrité et la performance d'un pieu

Comme présenté précédemment, il est possible d'évaluer l'intégrité d'un pieu et sa performance à partir de tests différents. Il est cependant impossible de déterminer la qualité d'un pieu à partir d'un essai de performance et inversement, sa capacité portante à partir d'un test d'intégrité. Réaliser les deux mesures sur un pieu devient vite coûteux. La mesure d'intégrité est généralement celle effectuée en raison du prix onéreux des tests de performance. Cependant, nous savons que la capacité portante d'un pieu va être affectée par la présence d'anomalies ainsi que par la qualité du béton. Une géométrie différente d'un pieu sain entraînera une modification positive ou négative des courbes de charge-déplacement. Ce mémoire cherche à réaliser un lien entre les anomalies détectées par les tests d'intégrités et la performance d'un pieu.

1.3 Les différents types d'anomalies des pieux

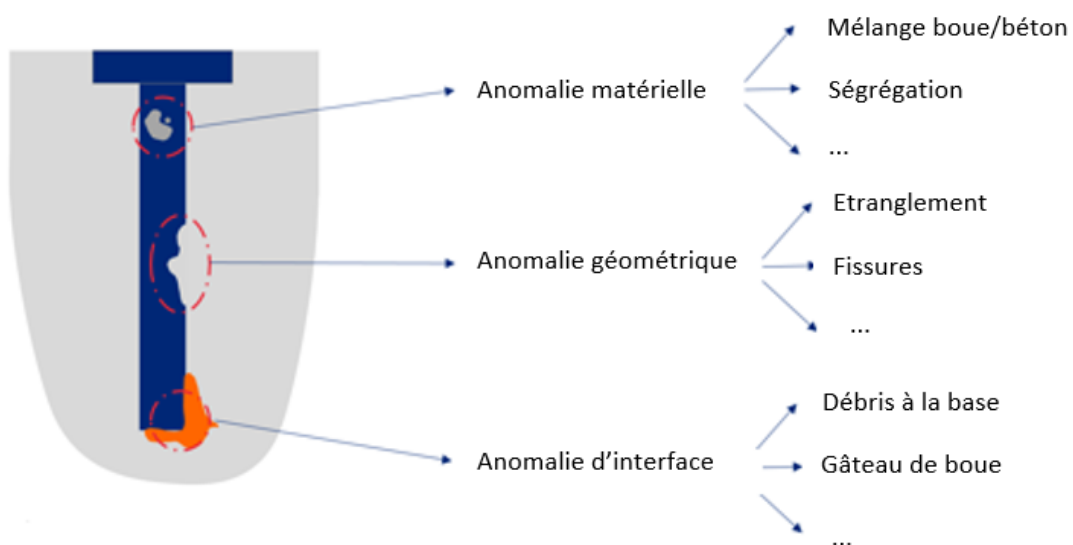


Figure 13 : Différents types d'anomalies (1)

1.3.1 Anomalies d'interfaces

Les anomalies d'interfaces sont localisées entre la base du pieu et le sol. Avant la mise en place du béton, des corps étrangers peuvent se retrouver au fond du forage. Il peut s'agir d'objets tombés de la surface du sol, de dépôts de matériaux via les eaux souterraines ou encore de boue bentonitique² résiduelle qui va former un gâteau de boue. Cela mènera à une réduction de la capacité de transfert des charges du pieu au sol. Le pieu reprenant moins de charge à la base, cela peut induire un tassement particulier de celui-ci.

1.3.2 Anomalies géométriques

Les anomalies géométriques peuvent se situer tout le long du fût du pieu. Après coulage du béton, le sol tente de revenir à sa place en lui exerçant une pression. Celui-ci va soit résister soit capituler et se déplacer. Une pression peut également être induite par le passage des engins de chantier à proximité du pieu. Cela va causer une altération de la forme du fût à certains endroits du pieu et donc une modification de la résistance. Le pieu peut présenter une extension ou une striction dans laquelle le béton est remplacé par du sol ou du vide. Ces modifications peuvent également être une conséquence d'un tubage sale auquel le béton s'accroche lors de son extraction du sol.



Figure 14 : Extension et striction (12)

1.3.3 Anomalies matérielles

Les anomalies matérielles peuvent être présentes sur toute la longueur du pieu. Elles peuvent être de plusieurs natures. Une inclusion de sol signifie que la composition du matériau constitutif du pieu a été altéré par des composants du sol environnant. Une ségrégation survient lorsque le mélange du béton est non-homogène. Les agrégats plus gros se retrouveront en pied de pieu et le mortier proche de la surface. Les eaux souterraines peuvent également être à l'origine du transport de particules fines. Une anomalie matérielle diminue la résistance du béton et donc du pieu.

² Boue de forage

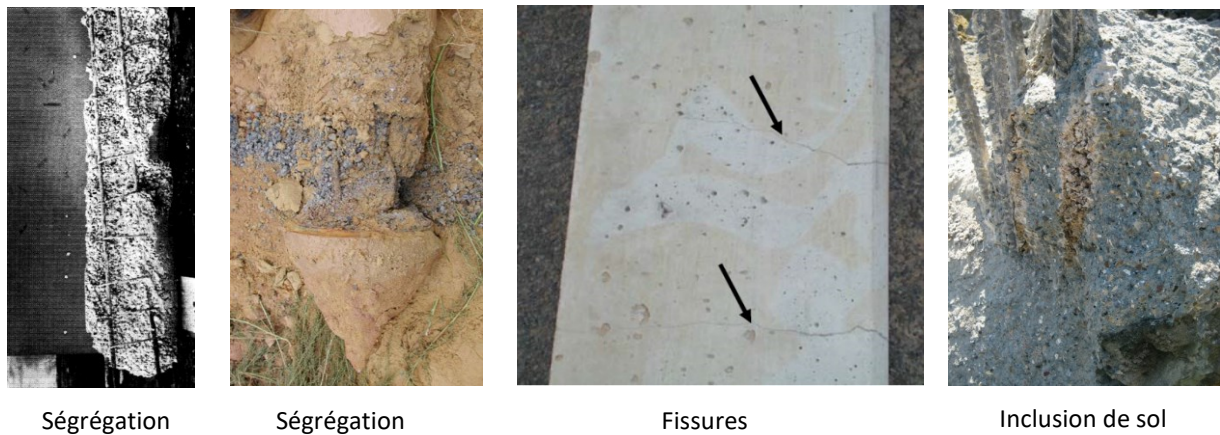


Figure 15 : Anomalies matérielles (12)

1.4 Formation des anomalies

1.4.1 Activités de construction à proximité des pieux

Une fois le béton coulé en place, il lui faut un certain temps avant de durcir. Des charges en surface du sol et à proximité du pieu, comme un passage d'un engin de génie civil, peuvent être véhiculée jusqu'au fût du pieu et y exercer une pression. Celle-ci va alors créer une striction dans le béton frais ou bien des fissures si le béton a eu le temps de durcir.

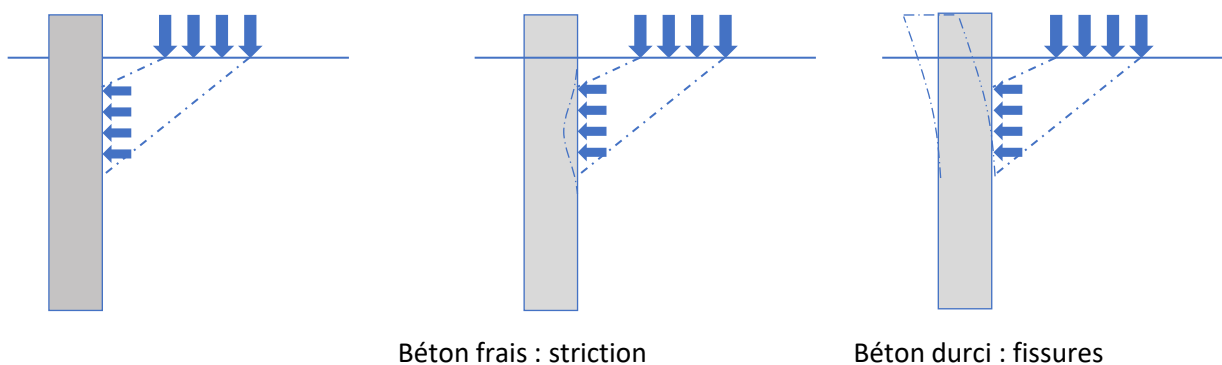


Figure 16 : Anomalies formées par des activités de construction à proximité (12)

1.4.2 Recépage des pieux

Après exécution du pieu, il est nécessaire d'éliminer la partie supérieure du béton sur une certaine hauteur. En effet, le béton se retrouvant sur cette partie est principalement celui qui a coulé en premier. Il est pollué par de la boue ou du déblai et remonte à la surface après le bétonnage. La résistance en tête de pieux est donc moindre causant un tassement supplémentaire. Le recépage s'effectue en faisant éclater le béton ce qui peut entraîner des fissures non visibles sous la surface du sol.

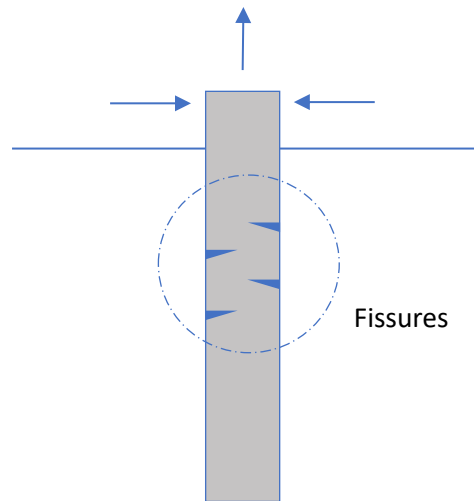


Figure 17 : Anomalies formées par le recépage du pieu (12)

1.4.3 Couche compressive

Une extension peut apparaître lorsque le sol est compressible. Le béton exerce une pression sur celui-ci qui sera plus élevée que la pression des terres. Le sol va donc laisser la place au béton et celui-ci va durcir en créant une extension.

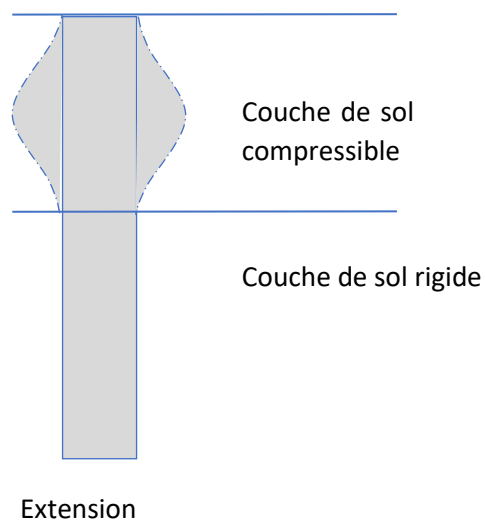


Figure 18 : Anomalies formées par une couche de sol compressive (12)

1.4.4 Praticabilité du béton

Le béton nécessaire à la construction de pieux en place doit être fluide mais également cohésif. Puisqu'il prend du temps avant de remplacer le sol dans le trou de forage, celui-ci reprend sa place. C'est pour cette raison que le béton a une fonction autocompactant. Il doit être suffisamment maniable et difficilement ségrégeable.

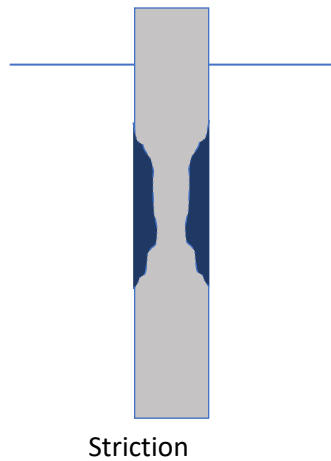


Figure 19 : Anomalies formées par une mauvaise praticabilité du béton (12)

1.4.5 Chute incontrôlée du béton

La mise en place du béton est une des dernières étapes de l'exécution des pieux. Elle n'est cependant pas la plus facile. Lors de sa mise en œuvre, les éléments les plus gros vont chuter au fond du forage tandis que les plus fins vont se retrouver en haut du pieu. Pour les pieux battus tubés, la vitesse de chute des gros granulats est ralentie par l'armature placée avant bétonnage tandis que la vitesse de la latence reste inchangée.

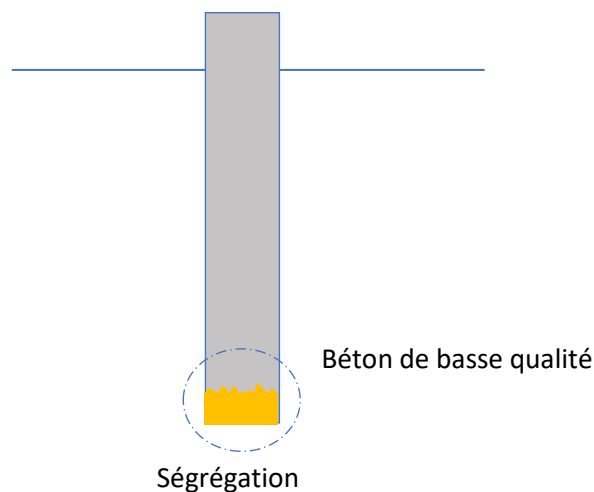
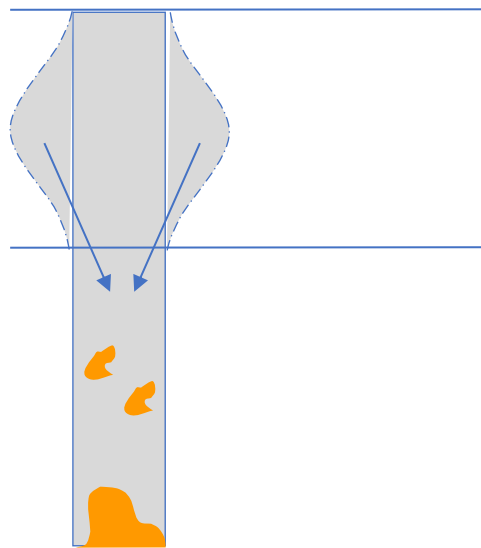


Figure 20 : Anomalies formées par la chute incontrôlée du béton (12)

1.4.6 Chute de sol dans le trou foré

Après le forage dans le sol, des particules de celui-ci peuvent tomber dans la cavité formée et ainsi rendre le béton coulé par après moins résistant. Généralement les fragments de sol proviennent d'une extension. La couche de sédiments résiduels engendre un mauvais contact à l'interface entre le pieu et le sol.



Extension et inclusions de sol

Figure 21 : Anomalies formées par du sol dans le forage (12)

1.4.7 Effets thermiques

La formation du béton étant un procédé thermique, celui-ci refroidit et se durcit après sa mise en place. Le retrait va générer des contraintes de tension créant ainsi des fissures dans le pieu.

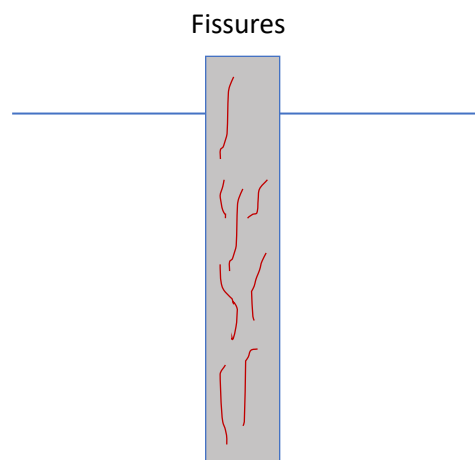


Figure 22 : Anomalies formées par les effets thermiques du béton (12)

1.4.8 Effets hydrauliques

Pour les pieux tubés réalisés dans un sol perméable, l'eau aura tendance à s'infiltrer sous le tubage lorsque celui-ci sera extrait. Le niveau d'eau s'équilibrera mais son passage va délayer le béton frais et risquer de mettre les armatures à nu. Une remontée de la nappe peut aussi entraîner un éboulement du sol.

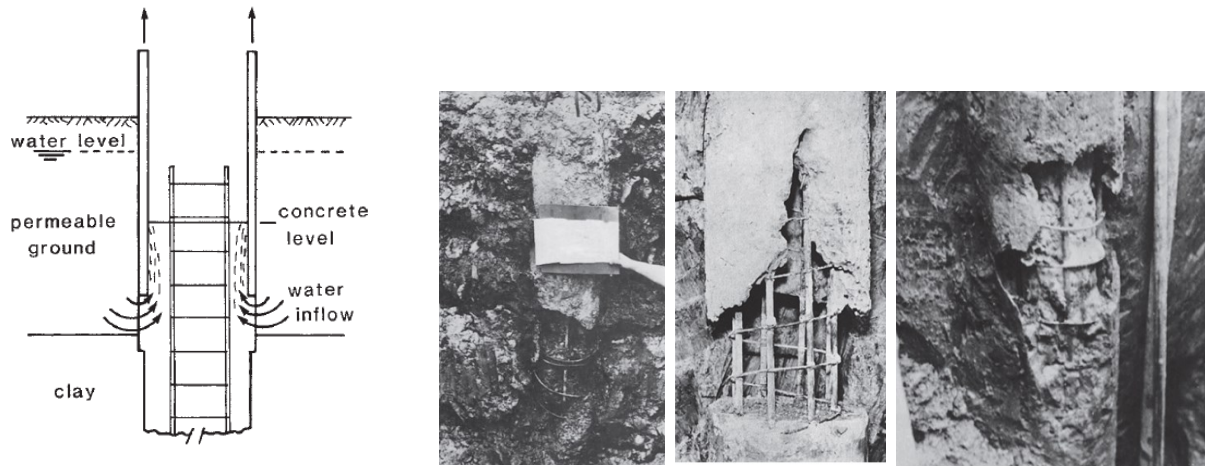


Figure 23 : Anomalies formées par les infiltrations d'eau (12)

Les eaux souterraines peuvent également être sous pression. Avec celle-ci, l'eau remonte à la surface en creusant des canaux dans le béton.

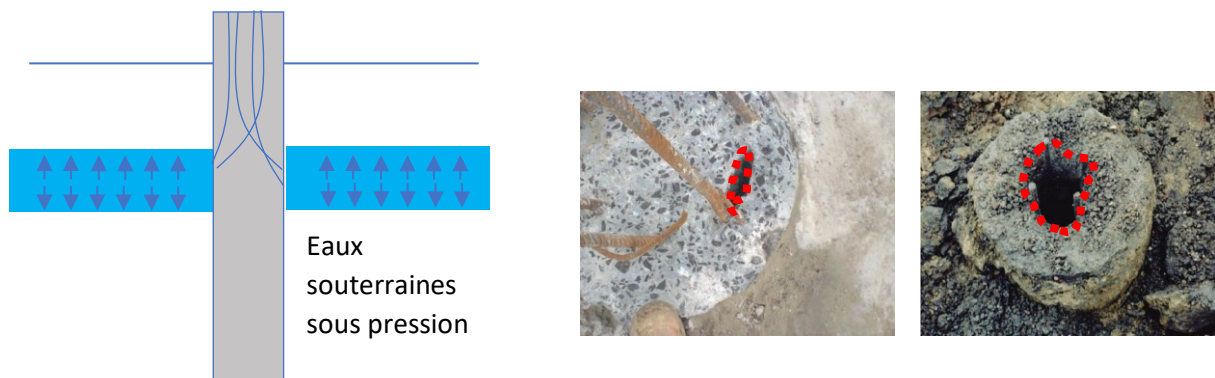


Figure 24 : Anomalies formées par les eaux souterraines sous pression (4)

1.5 Modélisation des anomalies dans la littérature

1.5.1 Poulos

Dans son article, Poulos (5) analyse les effets des anomalies sur le comportement des pieux. Il examinera principalement les courbes de charge-déplacement lorsque la fondation est soumise à un chargement axial. Plusieurs imperfections sont étudiées mais nous nous intéressons aux anomalies structurelles. La première anomalie que Poulos considère est une anomalie géométrique consistant en un rétrécissement de la section du pieu. Celle-ci est diminuée de 10% par rapport à un pieu intact. L'anomalie est localisée de 8m à 16m sous la surface. La figure ci-dessous représente deux courbes de charge-déplacement pour des pieux portants à la base. Le trait plein correspond au comportement d'un pieu sain tandis que le trait discontinu illustre le comportement d'un pieu comprenant l'anomalie géométrique.

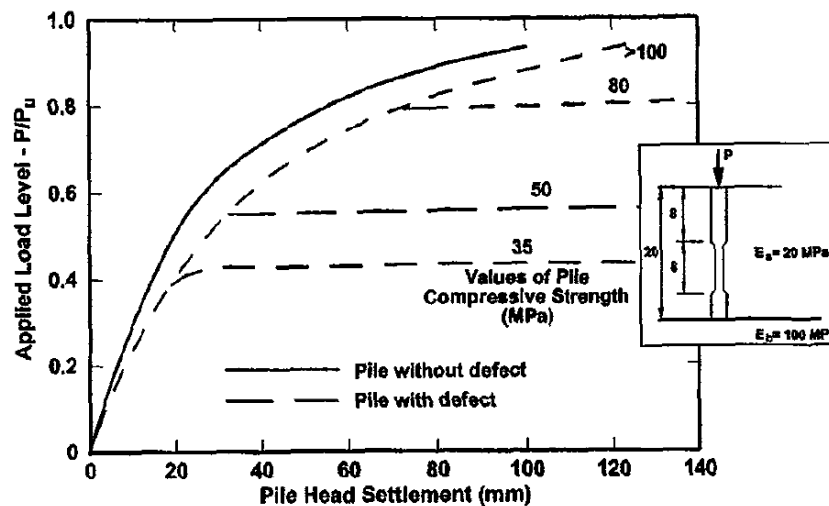


Figure 25 : Courbe de charge-déplacement pour différents bétons (5)

Une courbe de charge-déplacement permet d'observer le tassement du pieu lorsque celui-ci est soumis à différentes charges en tête de pieu. Cette charge P est normalisée par la capacité géotechnique ultime du pieu P_u .

Poulos a ainsi pu mettre en évidence les observations suivantes sur base des courbes :

- La présence d'une anomalie entraîne un tassement plus important pour une même charge appliquée sur le pieu ;
- Pour des pieux dont la résistance du béton à la compression est supérieure à 100 MPa, le pieu reste intact structurellement et l'augmentation du tassement est relativement faible ;
- Au fur et à mesure que la résistance à la compression du pieu diminue, le pieu se rompt structurellement à des charges plus faibles par rapport à la capacité géotechnique ;
- L'apparition d'une défaillance structurelle entraîne une augmentation très subite du tassement.

La conclusion tirée est que lorsque la résistance à la compression du béton est élevée, la rupture géotechnique surviendra avant la rupture structurelle du pieu. Et inversement, lorsque la résistance du béton est faible, le pieu rompt structurellement avant que la rupture géotechnique ne se produise.

Afin de pouvoir mesurer l'étendue d'une anomalie au sein d'un pieu, Poulos a développé un facteur que l'on appellera le facteur d'intégrité structurelle :

$$F_{SI} = \frac{E_d}{E} * \frac{A_d}{A} * \frac{L}{L_d}$$

Avec

- E le module de Young du pieu intact ;
- A la section transversale du pieu intact ;
- L la longueur du pieu totale.

Les termes comprenant un 'd' en indice sont les propriétés de la portion défectueuse de l'anomalie. Lorsque celle-ci est géométrique, c'est principalement le facteur géométrique A_d/A qui varie. L'empreinte de l'anomalie L/L_d permet d'intégrer la localisation dans le facteur. Lorsque l'anomalie est

structurale, c'est-à-dire un béton de qualité plus faible, le facteur mécanique E_d/E est la variable principale.

Un autre facteur mesure la performance du pieu. Il s'agit du facteur de réduction de la raideur en tête de pieu :

$$R_{KS} = \frac{\text{Raideur d'un pieu avec défaut structurel}}{\text{Raideur d'un pieu intact}}$$

La raideur est obtenue via la pente de la partie élastique dans la courbe de charge-déplacement.

En assumant que le pieu a une résistance à la compression suffisante afin de ne pas rompre structurellement, Poulos a réalisé des courbes théoriques reliant le facteur d'intégrité structural et la réduction de raideur en tête de pieu. Le premier graphe ci-dessous est d'application lorsque le pieu travaille en friction et à la base et le deuxième lorsque le pieu ne travaille qu'en friction.

Pour vérifier l'exactitude des courbes théoriques, Poulos et Xu ont réalisés des essais sur des modèles réduits. Les résultats sont représentés par des croix pour le pieux défectueux et par des ronds pour le pieu sain. Nous pouvons observer qu'ils correspondent avec la théorie.

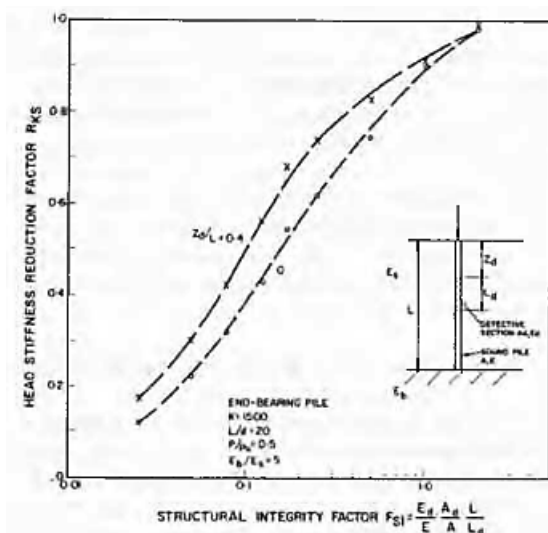


Figure 27 : Pieu portant à la base (7)

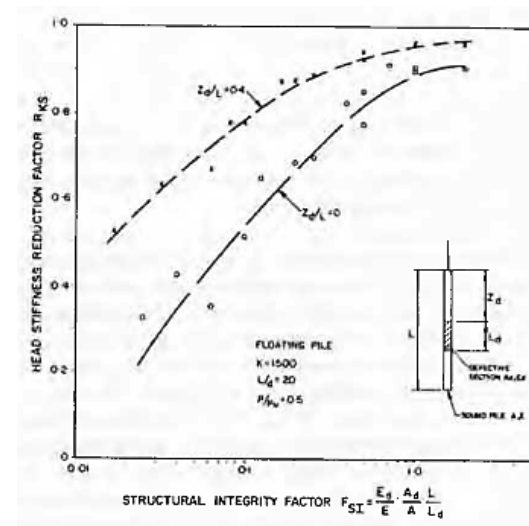


Figure 26 : Pieu flottant (7)

Les figures ci-dessus permettent également de constater ceci :

- Lorsque deux F_{SI} sont pareils, des anomalies différentes donnent des valeurs similaires pour R_{KS} ;
- Lorsque l'anomalie devient plus importante, F_{SI} décroît et R_{KS} va également décroître ;
- Une anomalie proche de la surface aura une influence plus élevée sur la raideur en tête de pieu que pour une même anomalie située plus en profondeur ;
- Pour un F_{SI} fixé, la réduction de raideur en tête de pieu sera plus importante lorsque le pieu porte à la base que pour un pieu travaillant en friction ;
- Les anomalies sont négligeables pour un $F_{SI} > 1$ car la courbe tend vers un R_{KS} valant 1.

Pour modéliser un pieu, Poulos utilise le programme DAMPA dans lequel le pieu ne peut bouger que verticalement et sa tête est fixe. Les anomalies sont ensuite incorporées en assignant des valeurs d'aires et de module de Young différentes de celles d'un pieu sain.

D'autres études menées en 2002 par Sarhan, O'Neill et d'autres, ont révélées que lorsqu'un vide dans le béton occupe 15% de la section transversale du pieu et qu'il pénètre la cage d'armatures, la résistance à la flexion est réduite de 30% par rapport à un pieu sain et la ductilité du fût est également affectée.

1.5.2 Les pieux forés : Petek ; Holtz ; Conrad

Les auteurs expliquent que les pieux forés sont les fondations profondes les plus sensibles aux techniques d'exécution. Elles sont sujettes aux anomalies ce qui pose un problème car les techniques de détections sont chères et/ou non fiables. Dans leur article, l'analyse des anomalies dans un pieu est effectuée avec le programme PLAXIS. PLAXIS a déjà été utilisé pour de nombreux problèmes théoriques et réels en tant qu'outil numérique. Les hypothèses du modèle sont les suivantes :

- Le modèle est axisymétrique pour tenir compte du fût circulaire ;
- La charge appliquée est distribuée en tête de pieu ;
- Le maillage est constitué d'éléments triangulaires à 6 nœuds ;
- Afin de considérer la rupture structurelle du béton, le modèle de Mohr-Coulomb est utilisé pour le béton et le sol ;
- Le sol est considéré comme cohésif ;
- Le béton est modélisé comme un matériau élastique-linéaire ayant comme caractéristiques $E=25 \text{ GPa}$; $\nu=0,2$; $\phi = 48^\circ$; $c'=4960 \text{ kPa}$; $\psi=0^\circ$.

Le modèle est ensuite validé en utilisant des données d'essais de chargement exécutés sur deux sites au Texas. Le premier est un test réalisé par Reese et O'Neill en 1988 sur un pieu foré. Il s'agit d'un sol constitué d'argile rigide ayant une résistance au cisaillement non drainé connue. Le deuxième test a été effectué à l'Université d'agriculture et mécanique du Texas en 1993 par le « National Geotechnical Experiment ». Le sol est constitué d'argile très raide à dure avec les paramètres de résistance non drainés et efficaces et les valeurs de module qui sont connus. Les courbes de charge-déplacement générées au centre du pieu numériquement et les valeurs in-situ sont ensuite comparées. À la suite de cela, des ajustements peuvent être appliqués au modèle :

- Un maillage global moyen amène de bons résultats mais un raffinement au voisinage du fût est nécessaire ;
- Une interface entre le sol et le fût permet d'éviter de trop réduire la résistance à l'interface ;
- Une résistance au cisaillement non-drainée pour le modèle de Mohr-Coulomb ;
- Le remaniement du sol environnant dû à l'exécution du pieu peut être modélisé en utilisant une résistance au cisaillement non-drainée réduite.

L'article va analyser deux types d'anomalies : un rétrécissement partiel du fût et une section entière du pieu avec une couche de béton de résistance plus faible.

La striction, considérée comme une anomalie géométrique, est modélisée défavorablement par un rectangle car la perte de section y est plus importante. Pour la simulation, les auteurs établissent l'hypothèse que le contact est plein entre le sol et le béton au sein de la striction. Le sol remplit donc le vide laissé par cette dernière. Les courbes de charge-déplacement sont ensuite produites lorsque l'anomalie se trouve à différents endroits du fût. La taille de la striction croît jusqu'à ce qu'un effet sur la capacité portante soit visible sur ces mêmes courbes.

Plusieurs résultats ont ainsi pu ressortir des simulations :

- La capacité portante d'un pieu n'est pas affectée lorsque les strictions se situent entre 50 et 70% de l'aire du pieu. La striction est définie comme $[1 - \frac{R_d^2}{R^2}]$;

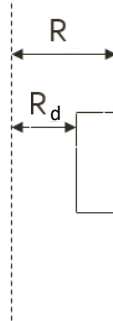


Figure 28 : Pourcentage de restriction

- Plus le sol environnant sera rigide, plus il reprendra une charge importante. Cependant lorsque qu'une anomalie géométrique est présente, son effet sur la capacité portante est plus important. Un sol plus rigide mène moins rapidement à une rupture géotechnique. Elle surviendra après la rupture du béton et l'absorption de la charge par le sol. L'anomalie aura un effet au-dessus et en-dessous de lui-même sur une distance équivalente à sa propre hauteur ;
- Un rétrécissement situé à proximité de la surface du sol influencera davantage la capacité portante du pieu qu'une anomalie localisée plus en profondeur.

Une hauteur de béton de moins bonne qualité est considérée comme une anomalie structurelle. Elle est modélisée comme deux hauteurs de couches ayant des résistances différentes. De nouveau, plusieurs courbes de charge-déplacement sont produites en déplaçant l'anomalie du haut au bas du pieu.

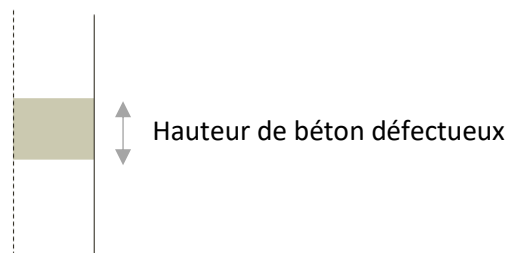


Figure 29 : Hauteurs de couches de résistance différentes

Plusieurs observations ont ainsi pu être faites :

- Lorsque le sol est moins rigide, la résistance du béton est tellement élevée que la couche faible n'aura pas d'impact sur la capacité du pieu. En revanche lorsque le sol est rigide, la portion plus faible du pieu se rompt et la charge est transmise au sol qui va à son tour subir une rupture géotechnique ;
- L'effet de l'anomalie est plus important quand la couche plus faible se situe proche de la surface du sol.

1.6 Conclusion

Les pieux forés étant sensibles à l'exécution, il est fréquent d'y trouver des imperfections. On peut les classer en 3 catégories : les anomalies matérielles, géométriques et d'interface. Beaucoup de phénomènes sont à l'origine de leurs formations, ce qui rend ces malformations communes. Elles vont impacter soit la performance en influençant l'état limite de service et/ou ultime, soit l'intégrité en affectant la durabilité de la fondation. Afin de déterminer les effets des imperfections, des contrôles de qualité sont réalisés pour mesurer l'intégrité ou la performance. Des tests indirects utilisant des valeurs physiques ou des test directes avec un carottage, vont localiser les anomalies dans le pieu sans les identifier. Des méthodes destructives ou non-destructives vont évaluer la capacité portante de la fondation profonde. L'objectif du mémoire est d'estimer la charge permise en tête de pieu en tenant compte des anomalies localisées grâce aux tests d'intégrités.

Approche par ressorts

Dans son article (5), H. G. Poulos réalise des courbes théoriques reliant le facteur d'intégrité structurelle et la réduction de raideur en tête de pieu. Cependant il ne détaille pas de manière exhaustive le fonctionnement du programme DAMPA et l'obtention des graphes. Dans la méthode d'analyse de son autre article (6), il mentionne que les anomalies structurelles sont incorporées via des valeurs d'aire transversale et des résistances de béton différentes. Nous allons tenter de reproduire son raisonnement afin de retomber sur ses graphes.

2.1 Modélisation de l'anomalie

Afin de caractériser les anomalies, différentes variables vont être utilisées :

- **Anomalies géométriques**

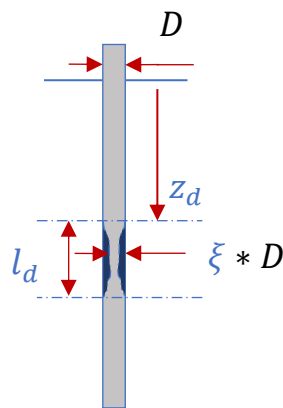


Figure 30 : Anomalie géométrique

z_d	La position de l'anomalie
l_d	L'empreinte de l'anomalie
$\xi = \frac{D_d}{D}$	L'amplitude de l'anomalie
D	Le diamètre du pieu
D_d	Le diamètre de l'anomalie

Tableau 1 : Variables d'une anomalie géométrique

- **Anomalies matérielles**

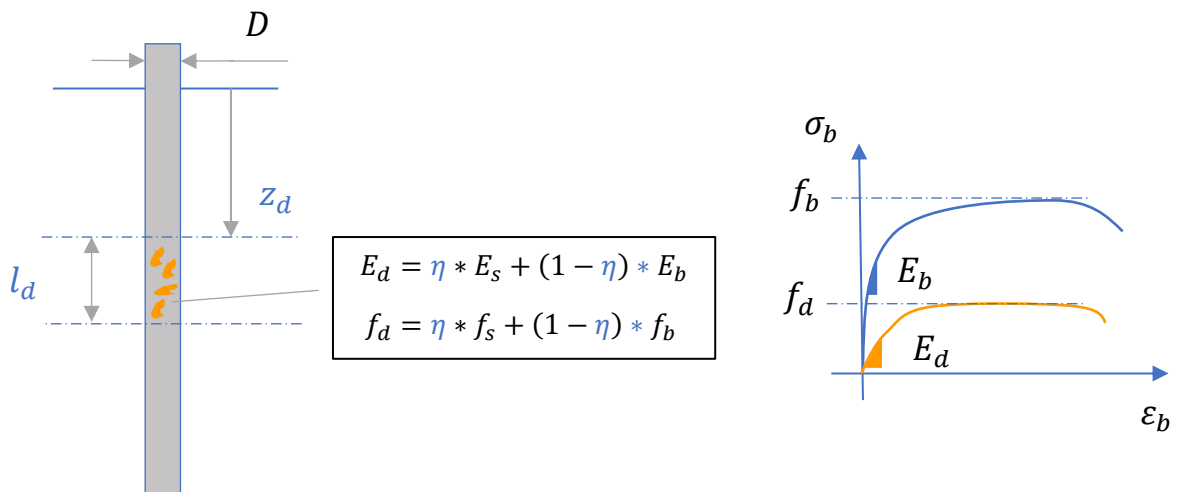


Figure 31 : Anomalie matérielle

Z_d	La position de l'anomalie
l_d	L'empreinte de l'anomalie
η	Le pourcentage d'inclusion de sol dans le béton
D	Le diamètre du pieu
E_d	Le module de Young de la couche défectueuse
E_b	Le module de Young du béton sain
E_s	Le module de Young du sol
f_b	La contrainte maximale en compression du béton
f_d	La contrainte maximale en compression de la couche défectueuse
f_s	La contrainte maximale en compression du sol

Tableau 2 : Variables d'une anomalie matérielle

Pour la suite du travail, l'empreinte, la position et l'amplitude de l'anomalie seront donnés en adimensionnel :

- L'amplitude sera définie comme $\xi = \frac{D_d}{D} \Leftrightarrow \xi^2 = \frac{A_d}{A}$
- La position comme $\zeta = \frac{z_d}{L}$
- Et l'empreinte comme $\lambda = \frac{l_d}{L}$

2.2 Elaboration du modèle

Une anomalie est caractérisée par une aire transversale ou une résistance de béton différente en fonction respectivement d'une anomalie géométrique ou matérielle. Ces deux valeurs permettent de trouver la rigidité du pieu. Cette rigidité est modélisée par un ressort. Pour obtenir un comportement linéaire élastique, le modèle est donc composé de ressorts en série et en parallèle. Le pieu est représenté par des ressorts en série et chacun de ces ressorts comporte un ressort parallèle afin de représenter la rigidité du sol entourant le pieu. Un dernier ressort sera situé en bas de pieu pour reproduire la rigidité de la réaction à la base.

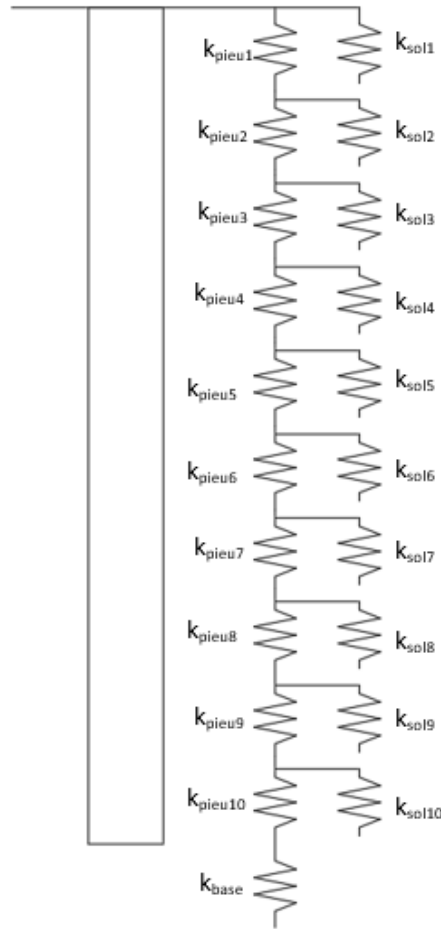


Figure 32 : Disposition des ressorts

L'ordonnée des graphes de Poulos étant R_{ks} , nous avons besoin de la rigidité en tête de pieu. On la calculera en utilisant les formules suivantes :

- **Lorsque les ressorts sont en parallèles**

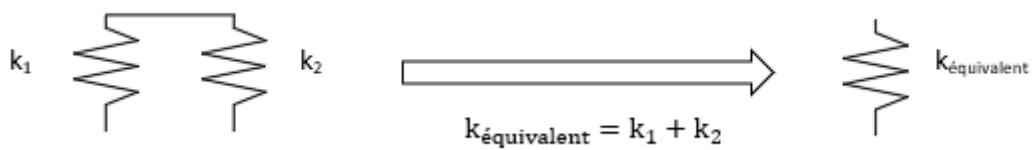


Figure 33 : Ressorts en parallèles

- **Lorsque les ressorts sont en séries**

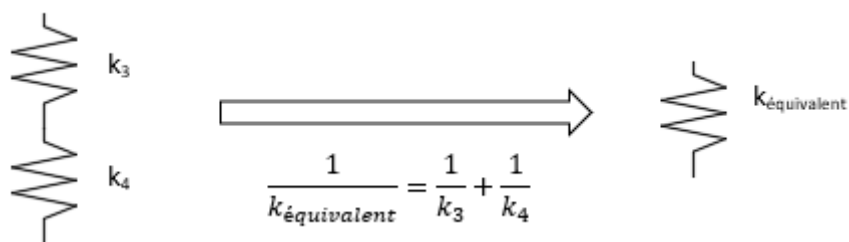


Figure 34: Ressorts en séries

Pour le pieu entier, le calcul du ressort équivalent débute à la base du pieu jusqu'à sa tête. Les ressorts équivalents sont calculés successivement jusqu'à n'en avoir qu'un seul.

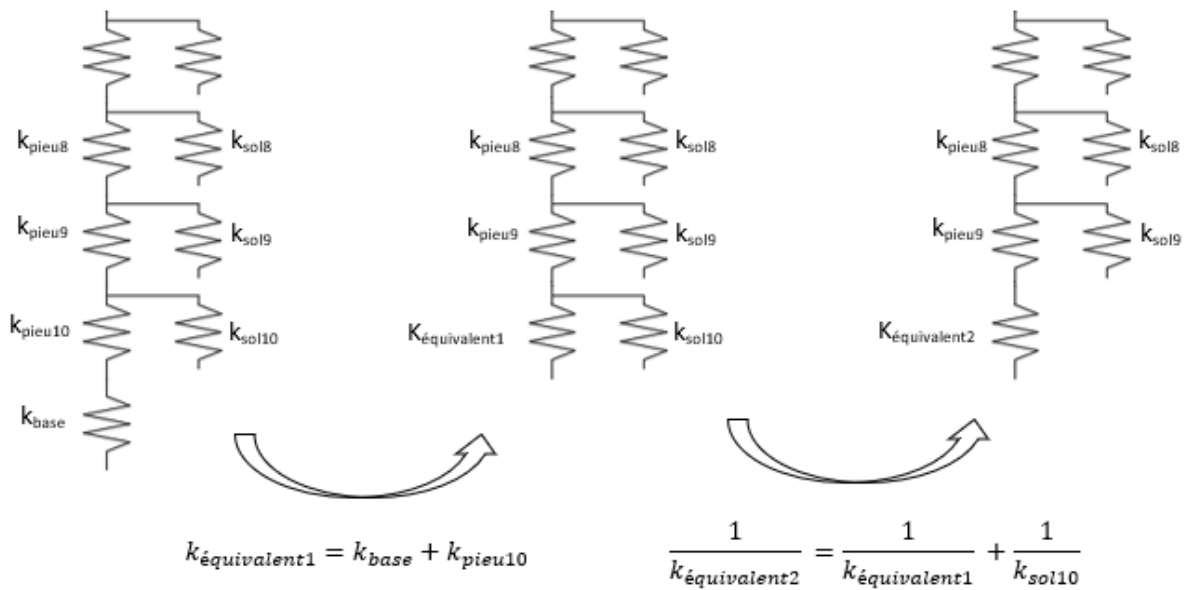


Figure 35 : Calcul ressorts équivalents

2.2.1 Données

Afin d'obtenir des courbes semblables à celles de Poulos, les valeurs approximées de k_{sol} , k_{base} et k_{pieu} sont nécessaires.

Pour cela, dans le cours de « Geotechnical Design » du Professeur Alain Holeyman et plus précisément dans l'article « Explicit method to predict the load-movement response of a pile » se trouve les formules suivantes permettant de définir les différentes rigidités :

- **La rigidité du pieu**

$$k_{pieu} = \frac{EA}{\Delta L}$$

Avec E le module de Young du béton, A la section transversale et ΔL la longueur du ressort.

- **La rigidité du sol**

$$k_{sol} = 1,5 * \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)}$$

Avec E_s le module de Young du sol et ν_s le coefficient de Poisson du sol.

- **La rigidité en base**

Deux résistances différentes peuvent intervenir, l'une en présence d'un pieu flottant et l'autre avec un pieu portant. Pour ce dernier, la rigidité de la base peut être définie comme :

$$k_{base} = 15 * 17,5 * q_c * D_{base}$$

Avec q_c la résistance au cône à la base lors du CPT et D_{base} le diamètre du pieu à la base. Tandis que si le pieu est flottant, la rigidité de la base est plus faible que la rigidité du sol et donc proche de 0.

En considérant un sol homogène sableux, une anomalie géométrique et en prenant en compte les valeurs de Poulos, les données sont les suivantes :

Le module d'élasticité du béton	$E=20*10^3$ [MPa]
Avec $K = \frac{E_{sol}}{E_{béton}} = 1500$, le module d'élasticité du sol	$E_s=13,3$ [MPa]
Le coefficient de Poisson du sol	$\nu_s=0,3$ [/]
La longueur du pieu	$L= 10$ [m]
Avec $\frac{L}{D} = 20$, le diamètre du pieu	$D= 0,5$ [m]
La résistance au cône en base du pieu	$q_c = 10$ [MPa]
La rigidité du sol	$k_{sol}=7,69*10^3$ [kN/m]

Tableau 3: Données du modèle ressorts

Une anomalie de forme rectangulaire est analysée. Son empreinte λ est fixée à 0,1, son diamètre D_d varie afin que F_{si} varie et les calculs sont réalisés pour $\zeta=0,4$ et $\zeta=0$ lorsque le pieu est portant et flottant.

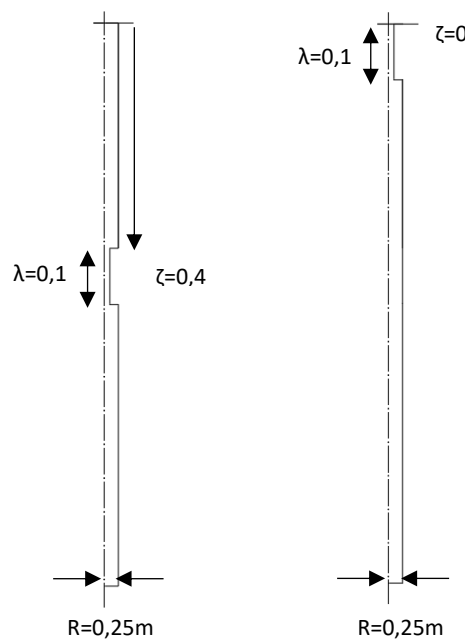


Figure 36 : Pieux analysés par Poulos

2.2.2 Résultats

Les graphes sur la gauche sont calculés via la méthode des ressorts équivalents décrite ci-dessus tandis que les graphes sur la droite sont les graphes obtenus par Poulos lors de ses simulations.

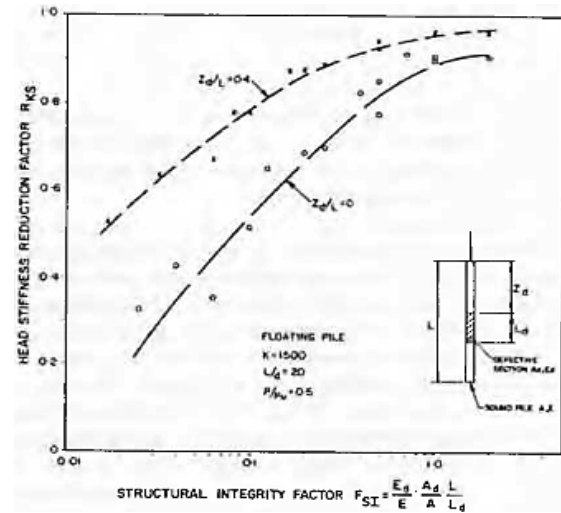
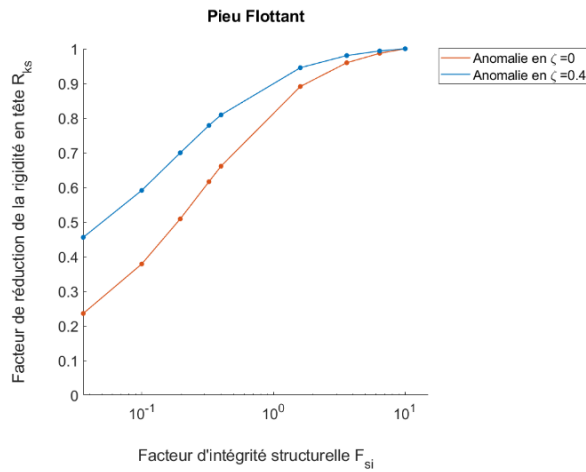


Figure 37 : Comparaison avec Poulos pour un Pieu Flottant

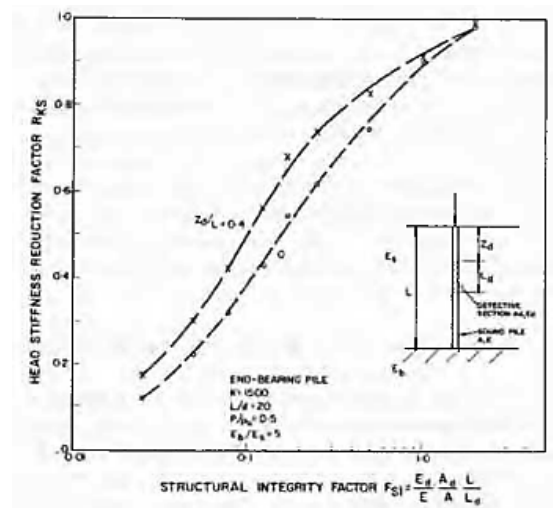
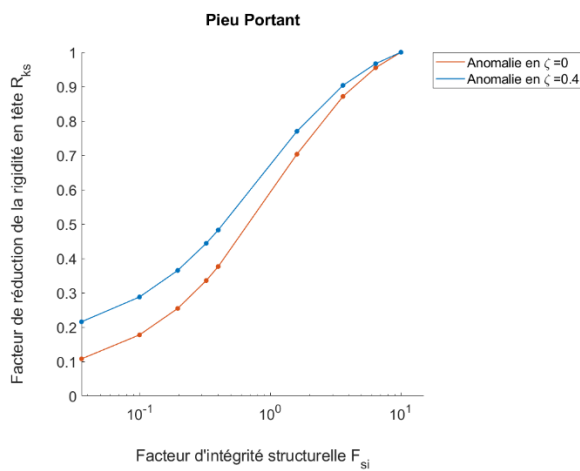


Figure 38 : Comparaison avec Poulos pour un Pieu Portant

Autant pour le pieu portant que flottant, les graphes sont semblables. Les différences sont attribuées à des imprécisions. On peut donc affirmer que Poulos a bien utilisé des ressorts pour modéliser ses pieux.

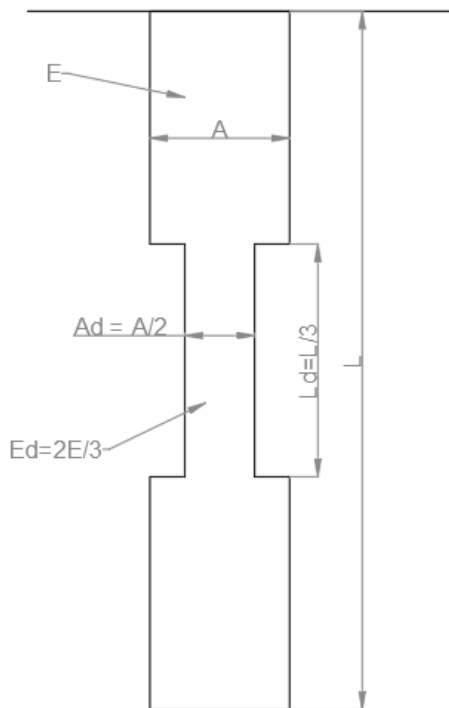
Cependant, les graphes présentés par Poulos ne tiennent pas compte de certaines spécificités qu’une anomalie dans un pieu peut présenter :

- Premièrement une anomalie n’a pas systématiquement une forme rectangulaire. En effet, elle peut prendre la forme d’un triangle ou encore une forme arrondie.
- Deuxièmement Poulos ne tient pas compte de la base pouvant se développer dans l’anomalie. Puisqu’une des hypothèses citées dans l’article de Petek (7) stipule que le sol remplit entièrement la cavité laissée par le béton, une partie de la capacité portante est reprise par celui-ci.
- Troisièmement une anomalie peut se former à différentes profondeurs tout le long du pieu. Poulos a regardé pour une anomalie située en tête de pieu et une en milieu de pieu. Mais elle peut également se développer à la base.

- Finalement, l’empreinte d’une anomalie, c’est-à-dire sa hauteur, peut également varier et prendre presque toute la hauteur du pieu.

2.3 Discussion F_{si}

Pour définir l’abscisse de ses graphes, Poulos utilise le facteur d’intégrité structurelle F_{si} qui prend en compte la position, l’amplitude et l’empreinte de l’anomalie. Cependant, il mélange les anomalies géométriques et matérielles alors qu’elles ont des mécanismes de rupture différents. De plus, un F_{si} valant 1 ne signifie pas forcément un pieu intègre :



$$F_{si} = \frac{\frac{E_d A_d}{L_d}}{\frac{E A}{L}} = \frac{\frac{\frac{2E}{3} * \frac{A}{2}}{\frac{L}{3}}}{\frac{EA}{L}} = 1$$

Figure 39 : Exemple d'anomalie où $F_{si} = 1$

On différencie alors les deux types d’anomalies en remplaçant F_{si} par E_d/E pour une anomalie matérielle et par A_d/A pour une anomalie géométrique. Un pieu sain aura alors une abscisse valant 1 puisque $E_d = E$ et $A_d = A$. La distinction entre un pieu comportant une striction avec $\xi^2 < 1$ et un pieu comportant une extension avec $\xi^2 > 1$ est également plus simple.

2.4 Variation de la forme de l’anomalie

L’anomalie peut se présenter sous différentes formes. Trois formes vont être étudiées dans ce travail : la forme rectangulaire, triangulaire et une forme arrondie qui est considérée comme intermédiaire aux deux premières.

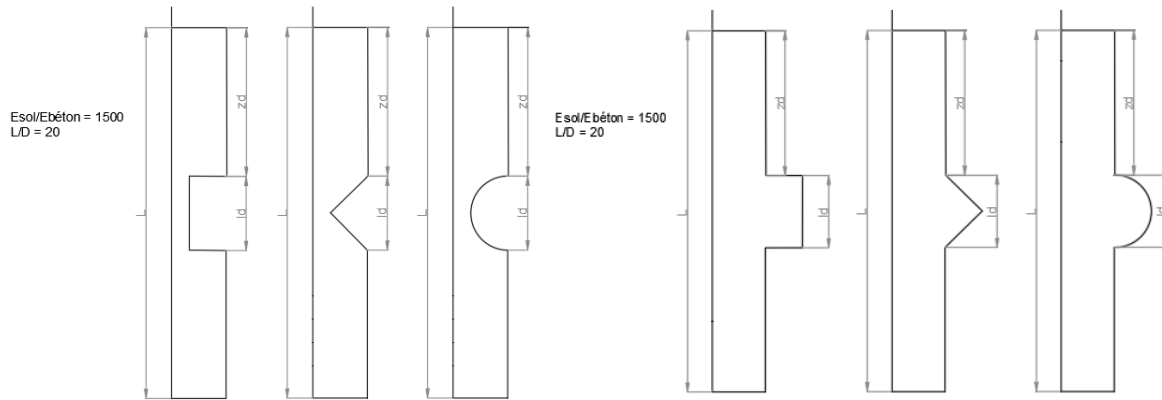


Figure 40 : Formes d'anomalie étudiées

L'anomalie peut se présenter sous la forme d'une striction ou d'une extension du fût. Afin de déterminer avec précision la section du pieu et donc la rigidité des ressorts au niveau de l'anomalie, le ressort ayant la longueur de l'empreinte a été divisé en 20 ressorts plus petits.

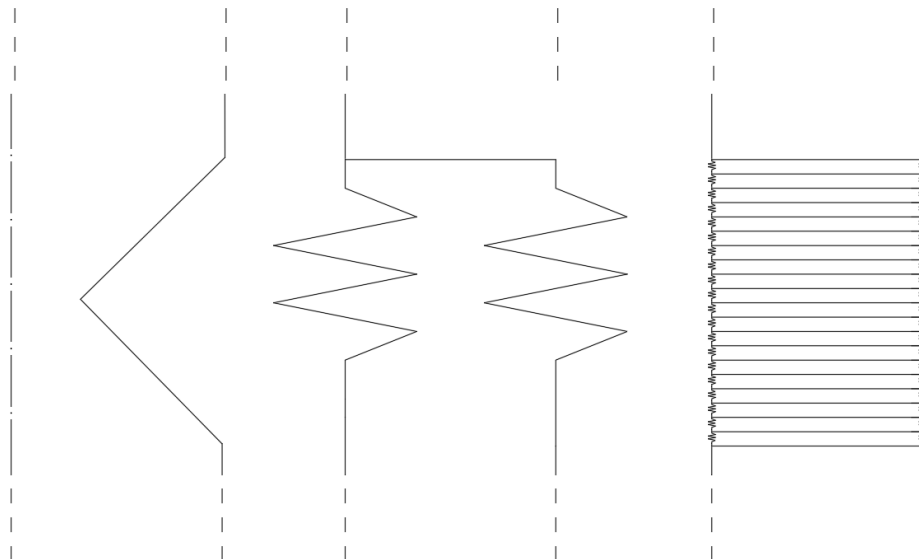


Figure 41 : Raffinement du ressort à l'anomalie

Chacune des rigidités de ces ressorts dépend de la section du pieu à l'endroit où elle se trouve dans l'anomalie. Grâce aux caractéristiques de celle-ci comme son empreinte et sa forme, il est possible de déterminer l'aire du béton à chaque ressort.

2.4.1 Forme rectangulaire

La première forme est la plus simple à modéliser, il s'agit d'un rectangle. C'est celle que Poulos a utilisé pour créer ses graphes. Les ressorts du pieu au niveau de l'anomalie auront tous la même rigidité puisque la section du pieu sera constante et vaudra :

- Pour une striction

$$\text{Rayon du pieu} = R - \xi * R$$

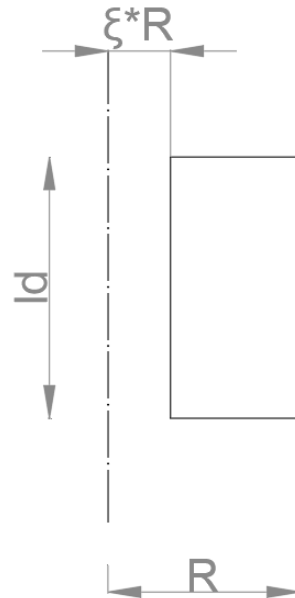


Figure 42 : Anomalie rectangulaire

- Pour une extension

$$\text{Rayon du pieu} = \xi * R$$

2.4.2 Forme triangulaire

La seconde forme étudiée est triangulaire. Dans le cas d'une striction, les ressorts du pieu au niveau de l'anomalie auront des rigidités décroissantes, de manière constante, jusqu'en $z_d + l_d/2$ où la rigidité vaut $\xi * R$. Les rigidités augmenteront, de nouveau de manière constante, jusqu'en $z_d + l_d$ où elle vaudra R . Avec l'empreinte et l'amplitude de l'anomalie, il est alors possible de déterminer chaque rigidité. y est défini comme la perte de rayon du pieu et x comme la profondeur en partant du haut de l'anomalie c'est-à-dire en z_d .

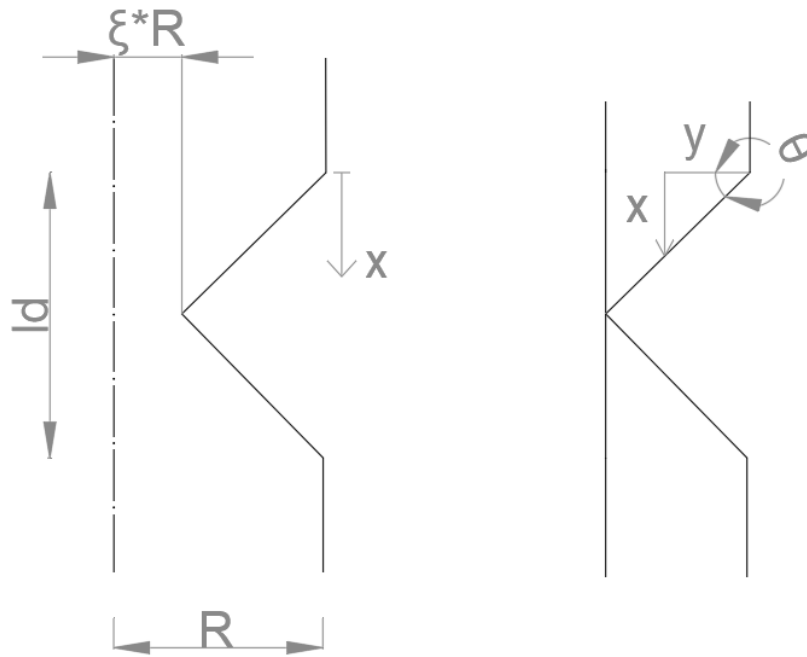


Figure 43 : Anomalie triangulaire

- Pour une striction du pieu :

La section du pieu à une profondeur x à partir du haut de l'anomalie vaut :

$$\tan\theta = \frac{x}{y} = \frac{l_d/2}{(1-\xi)R} \Leftrightarrow y = \frac{x(1-\xi)R}{l_d/2}$$

$$\text{Section du pieu en } x = \left(R - \frac{x(1-\xi)R}{l_d/2} \right)^2 * \pi$$

- Pour une extension du pieu

La section du pieu à une profondeur x à partir du haut de l'anomalie vaut :

$$\tan\theta = \frac{x}{y} = \frac{l_d/2}{(\xi-1)R} \Leftrightarrow y = \frac{x(\xi-1)R}{l_d/2}$$

$$\text{Section du pieu en } x = \left(R + \frac{x(\xi-1)R}{l_d/2} \right)^2 * \pi = \left(R - \frac{x(1-\xi)R}{l_d/2} \right)^2 * \pi$$

2.4.3 Forme elliptique

La dernière forme étudiée est l'ellipse. Au départ, la forme circulaire était envisagée. Mais après réflexion, il est apparu qu'avec un cercle, ξ et l_d s'influençaient l'un l'autre lorsqu'ils variaient. Puisqu'ils

sont indépendants, la forme elliptique a été utilisée afin que si l_d varie, cela n'affecte pas ξ et inversement.

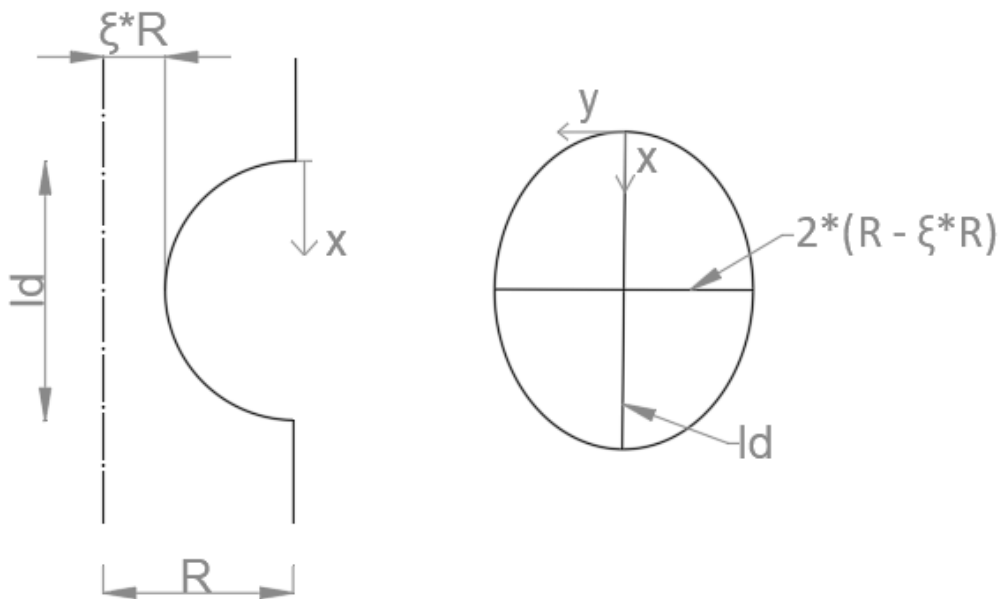


Figure 44 : Anomalie elliptique

- Pour une striction du pieu

En reprenant la formule d'une ellipse avec le grand axe valant l_d et le petit axe $2*(R - \xi*R)$, la section du pieu à une profondeur x à partir du haut de l'anomalie vaut :

$$\frac{y^2}{(R - \xi * R)^2} + \frac{(x - l_d/2)^2}{(l_d/2)^2} = 1 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{y^2}{(R - \xi * R)^2} = \frac{(l_d/2)^2 - (x - l_d/2)^2}{(l_d/2)^2}$$

$$\Leftrightarrow y = \frac{(R - \xi * R)}{l_d/2} \sqrt{(l_d/2)^2 - (x - l_d/2)^2}$$

$$\text{Section du pieu}_{en x} = \left(R - \left(\frac{(R - \xi * R)}{l_d/2} \sqrt{(l_d/2)^2 - (x - l_d/2)^2} \right) \right)^2 * \pi$$

- Pour une extension du pieu

En reprenant la formule d'une ellipse avec le grand axe valant l_d et le petit axe $2*(\xi*R - R)$, la section du pieu à une profondeur x à partir du haut de l'anomalie vaut :

$$\frac{y^2}{(\xi * R - R)^2} + \frac{(x - l_d/2)^2}{(l_d/2)^2} = 1 \Leftrightarrow \frac{y^2}{(\xi * R - R)^2} = \frac{(l_d/2)^2 - (x - l_d/2)^2}{(l_d/2)^2}$$

$$\Leftrightarrow y = \frac{(\xi * R - R)}{l_d/2} \sqrt{(l_d/2)^2 - (x - l_d/2)^2}$$

$$\text{Section du pieu en } x = \left(R + \left(\frac{(\xi * R - R)}{l_d/2} \sqrt{(l_d/2)^2 - (x - l_d/2)^2} \right) \right)^2 * \pi$$

$$= \left(R - \left(\frac{(R - \xi * R)}{l_d/2} \sqrt{(l_d/2)^2 - (x - l_d/2)^2} \right) \right)^2 * \pi$$

2.4.4 Résultats

Les résultats suivants sont basés sur les considérations suivantes :

- L'anomalie a sa position en $\zeta=0,45$;
- L'anomalie a une empreinte de $\lambda=0,1$;
- L'anomalie a une amplitude variant de $\xi=0$ à 2. L'axe des abscisses dépend de A_d la section du pieu la plus petite dans l'anomalie. A_d varie donc de 0 à 2A, A étant la section du pieu sain.

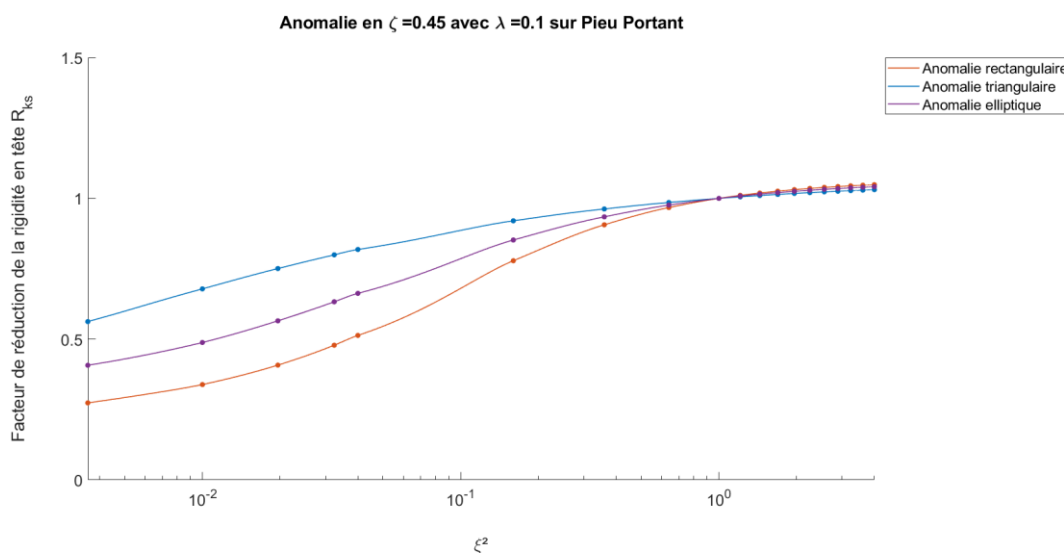


Figure 45 : Variation de la forme pour un pieu portant en $\zeta=0.45$ et $\lambda=0.1$

Une anomalie de forme rectangulaire aura une perte de rigidité en tête de pieu plus importante. En effet, c'est la forme la plus contraignante car la perte de section du pieu est constante et maximale sur toute la hauteur de l'anomalie. La perte de rigidité en tête de pieu sera moins importante avec une anomalie triangulaire. Au milieu des deux courbes se trouve l'anomalie elliptique puisque la perte de section est plus grande que pour une forme triangulaire mais plus petite qu'une forme rectangulaire.

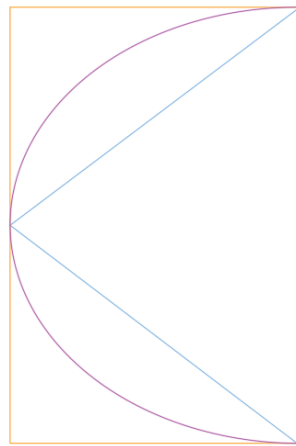


Figure 46 : Perte de section des trois formes

Si l'anomalie est une extension, la forme de l'anomalie aura peu d'impact sur la rigidité en tête de pieu.

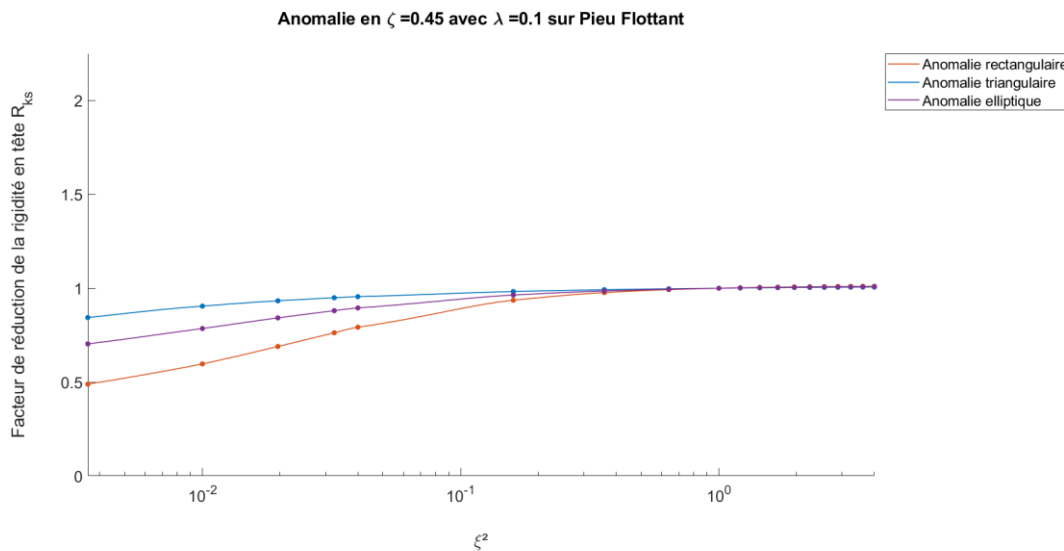


Figure 47 : Variation de la forme pour un pieu flottant en $\zeta=0.45$ et $\lambda=0.1$

Lorsque le pieu devient flottant, la perte de rigidité R_{ks} est plus faible en présence d'une anomalie. Cela s'explique par le fait que la rigidité du sol est plus importante que celle du pieu. Un changement dans cette dernière est donc négligeable sur la rigidité totale.

De nouveau, avec une extension du fût du pieu, la forme de l'anomalie n'impactera que faiblement la rigidité en tête de pieu.

2.5 Ajout d'une base supplémentaire au niveau de l'anomalie

Le sol remplissant la cavité laissée par le béton, une base peut se former au niveau de l'anomalie. Poulos n'en tient pas compte dans ses simulations mais elles peuvent avoir une influence sur la rigidité en tête de pieu. Cette base supplémentaire est représentée par un ressort additionnel positionné en

parallèle avec les ressorts modélisant le sol et le pieu. La rigidité de cette base sera calculée avec la même formule que celle utilisée pour la base en bas du pieu :

$$k_{\text{base}} = 15 * 17,5 * q_c * \Delta D$$

Le diamètre ΔD vaudra la différence entre le rayon maximum et le rayon minimum sur le ressort. Les conditions limites de l'équation fonctionne avec le modèle car lorsque le pieu est sain, le rayon interne vaudra le rayon externe donnant un diamètre nul. Ce qui signifie qu'il n'y a pas de base supplémentaire. Lorsque l'anomalie est présente sur toute la section du pieu, le rayon interne vaut 0 et la rigidité de la base supplémentaire est similaire à la rigidité de la base en bas de pieu. L'équation utilisée est alors crédible.

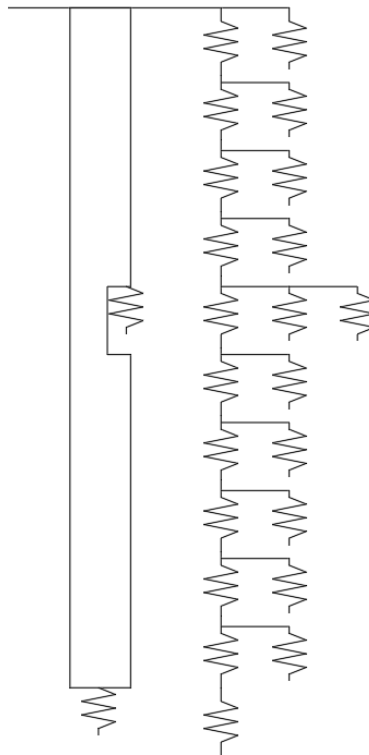


Figure 48 : Ressort modélisant la base supplémentaire

Pour une anomalie rectangulaire, le ressort de la base supplémentaire se situe en z_d . Un seul ressort représente la base contrairement aux deux formes suivantes.

Pour une anomalie triangulaire, chaque ressort du pieu se situant entre z_d et $z_d + l_d$ aura un ressort en parallèle représentant une base supplémentaire. Les ressorts représentant les rigidités des bases supplémentaires ont les mêmes ΔD . L'apport de rigidité est donc constant tout le long de l'anomalie.

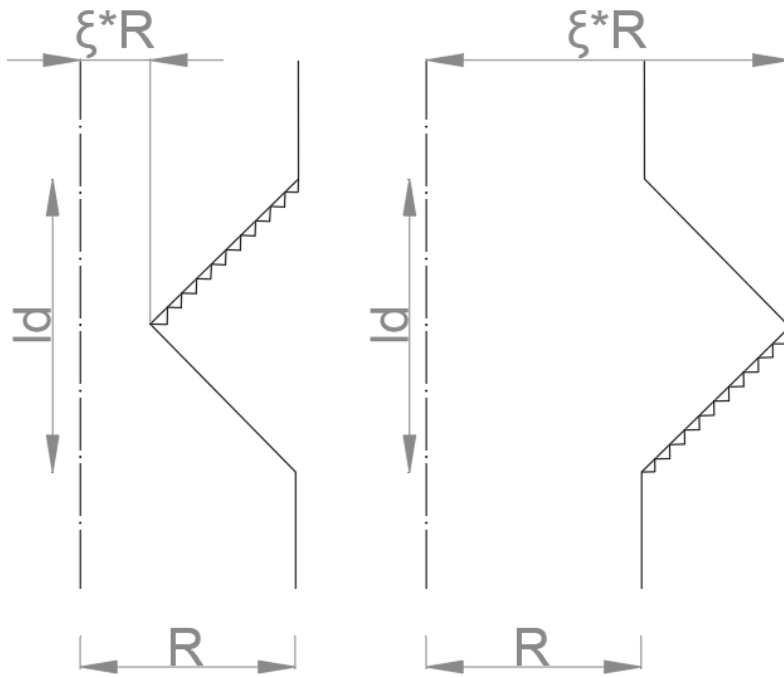


Figure 49 : Ressorts supplémentaires pour une forme triangulaire

Chaque échelon représente une force de friction entre le sol et le béton ainsi que la base supplémentaire créée par le sol dans l'anomalie.

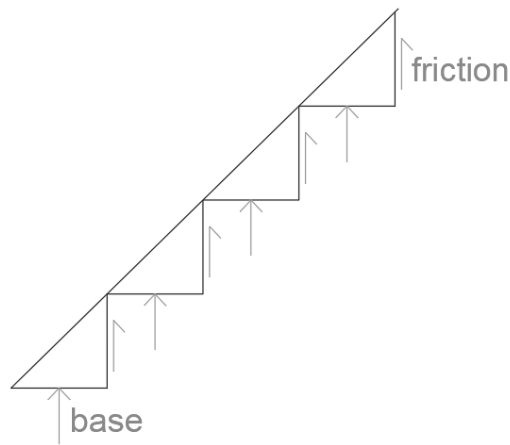


Figure 50 : Division en forces de friction et base supplémentaire

Les ressorts clairs sur la figure ci-dessous sont les ressorts représentant la rigidité du sol. Les ressorts foncés au centre représentent les bases supplémentaires tandis que les ressorts à gauche sont les rigidités du pieu.

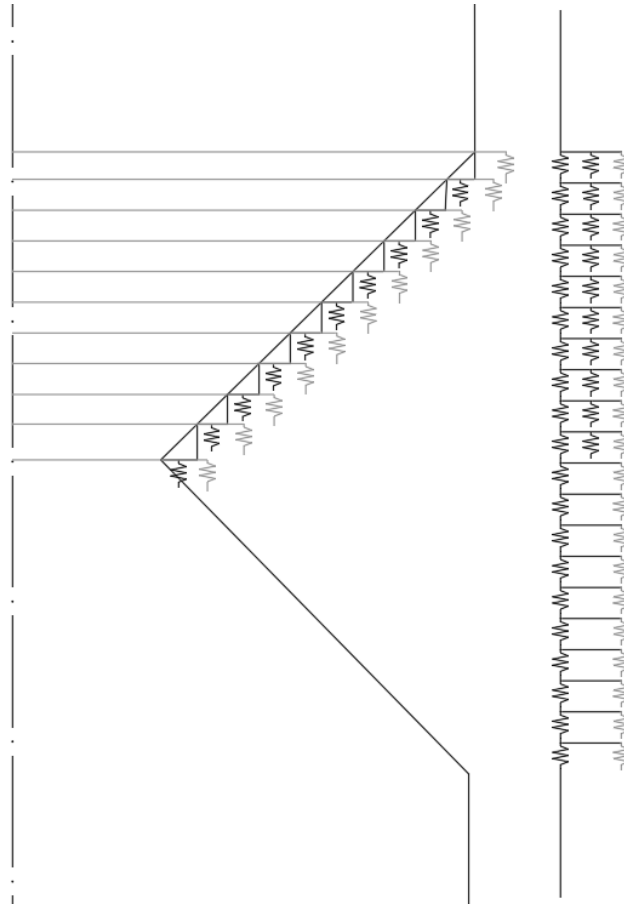


Figure 51 : Division d'une anomalie triangulaire en ressorts

Pour une anomalie elliptique, la rigidité des ressorts des bases supplémentaires va varier tout le long de l'anomalie. Elle diminue lorsque l'on se rapproche du centre de l'anomalie, là où la section est minimale.

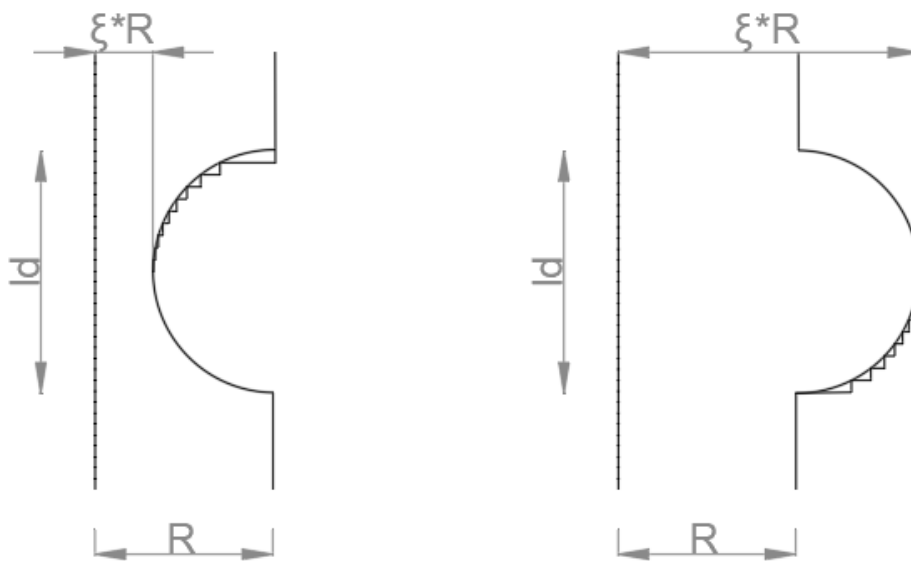


Figure 52 : Ressorts supplémentaires pour une forme elliptique

2.5.1 Résultats

Comme dans la section précédente, les résultats se basent sur les considérations suivantes :

- L'anomalie a sa position en $\zeta=0,45$;
- L'anomalie a une empreinte de $\lambda=0,1$;
- L'anomalie a une amplitude variant de $\xi=0$ à 2. L'axe des abscisses dépend de A_d la section du pieu la plus petite dans l'anomalie. A_d varie donc de 0 à $2 \cdot A$, A étant la section du pieu sain.

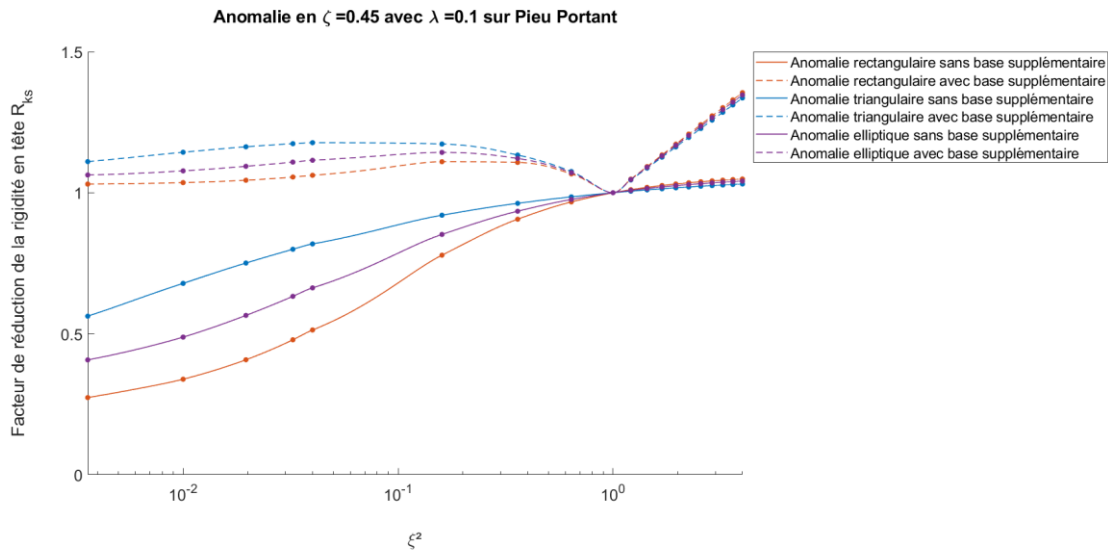


Figure 53 : Rajout d'une base supplémentaire pour un pieu portant en $\zeta=0,45$ et $\lambda=0,1$

En rajoutant une base supplémentaire au niveau de l'anomalie, la rigidité en tête de pieu augmente. Cette augmentation sera plus élevée pour une anomalie rectangulaire car la rigidité ajoutée pour la base est importante contrairement aux deux autres formes où les rigidités sont plus faible et leur impact est réduit par les calculs successifs pour obtenir le ressort équivalent.

Avec une extension de fût, l'ajout d'une base augmentera fortement la rigidité en tête de pieu.

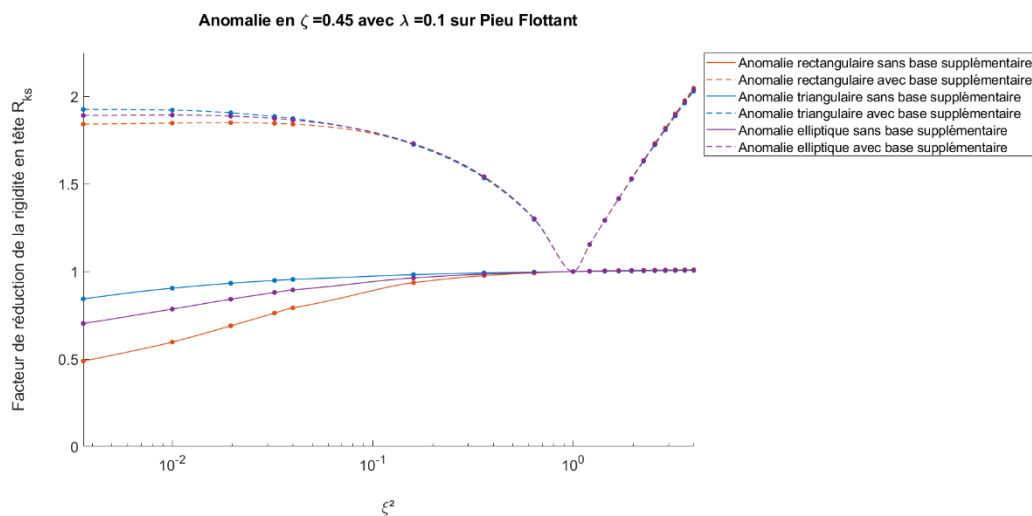


Figure 54 : Rajout d'une base supplémentaire pour un pieu flottant en $\zeta=0,45$ et $\lambda=0,1$

L'ajout d'une base pour un pieu flottant va rigidifier davantage la tête de pieu. Un pieu flottant n'utilise que le frottement. Or celui-ci le rend très rigide. La base supplémentaire va ajouter du frottement donc de la rigidité supplémentaire. Cela s'explique par le fait que la rigidité du sol est supérieure à celle du pieu. Une variation de la rigidité de ce pieu sera donc négligeable dans la rigidité totale.

2.6 Variation de la position de l'anomalie

Dans son article, Poulos regarde l'effet de l'anomalie lorsque celle-ci se situe en tête du pieu et à une profondeur de $\zeta = 0,4$. Mais une anomalie peut également se développer en base de pieu. Sa présence est étudiée pour $\zeta = 0$, $\zeta = 0,4$ et $\zeta = 0,8$ tout en conservant une empreinte de $\lambda = 0,1$.

2.6.1 Résultats

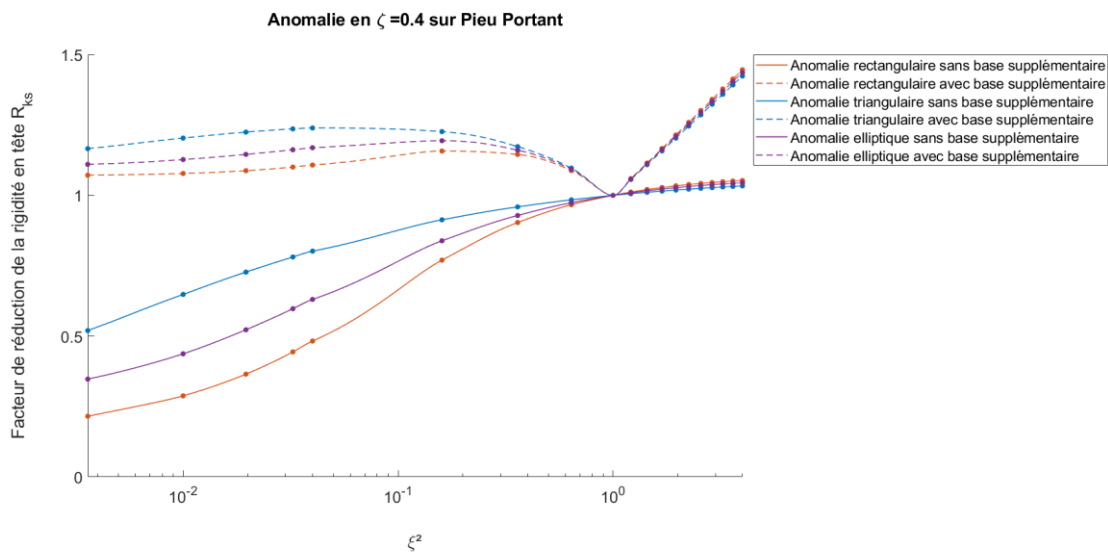


Figure 55 : Variation de la position pour un pieu portant en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$

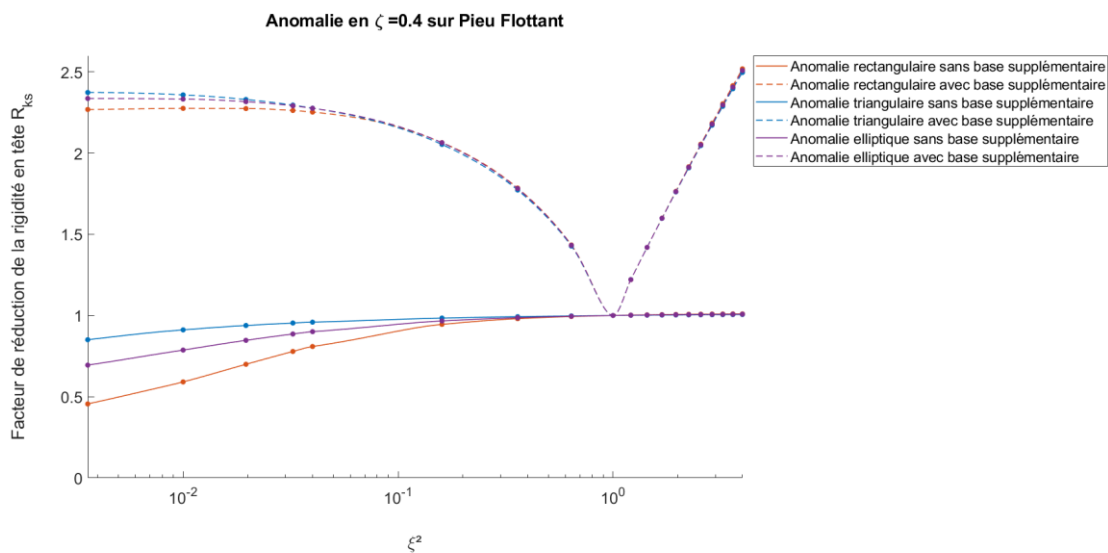


Figure 56 : Variation de la position pour un pieu flottant en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$

Qu’importe la position de l’anomalie, la forme elliptique est au milieu des deux autres formes. Cela se confirme par les graphes en Annexe A pour des positions en $\zeta=0$ et $\zeta=0,8$. L’anomalie elliptique est utilisée pour comparer les résultats lorsque la position de l’anomalie varie.

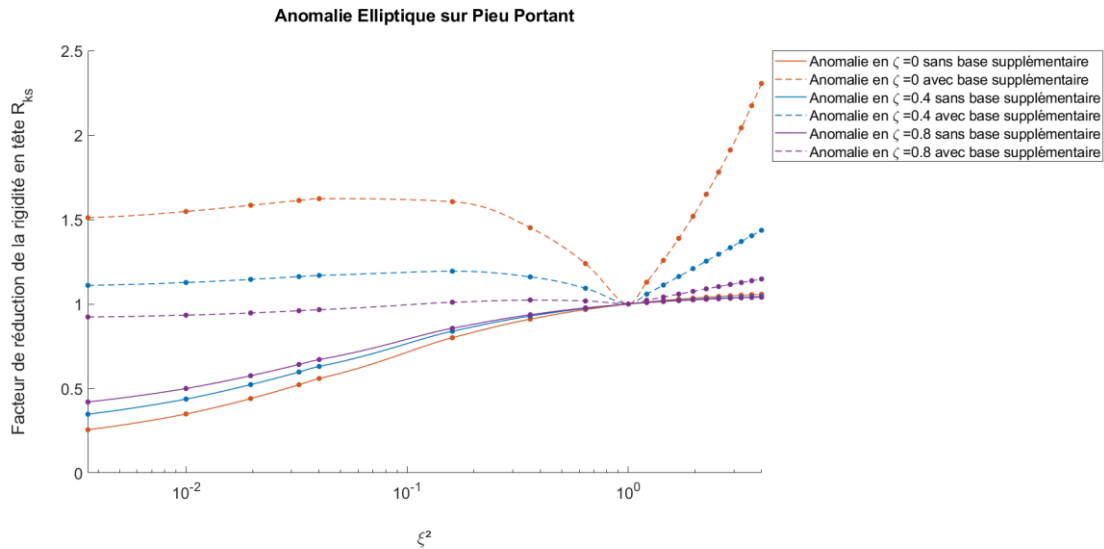


Figure 57 : Variation de la position pour un pieu portant de forme elliptique

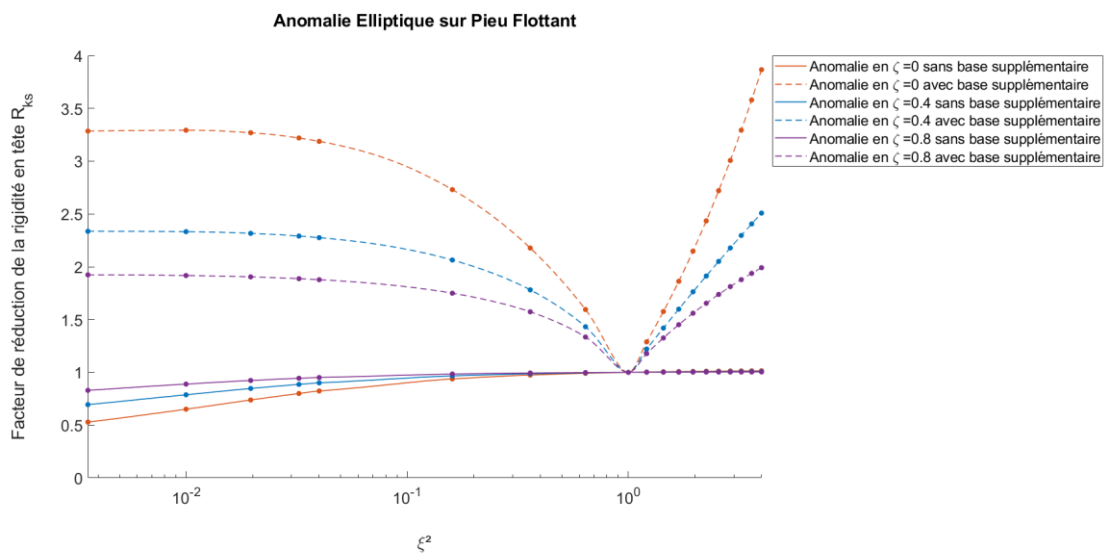


Figure 58 : Variation de la position pour un pieu flottant de forme elliptique

Une anomalie présente en tête de pieu aura plus d’impact sur la rigidité en tête de pieu qu’une anomalie située en base de pieu. Plus l’anomalie se forme profondément sous la surface de la terre, moins la rigidité en tête de pieu est impactée. Mais plus l’anomalie est proche de la surface, plus la base supplémentaire augmentera la rigidité en tête de pieu. En Annexe A, les graphes pour une forme rectangulaire et triangulaire amènent aux mêmes conclusions. Pour une striction rectangulaire située en $\zeta=0$, aucune base supplémentaire ne se forme car le sol ne porte pas de partie du pieu.

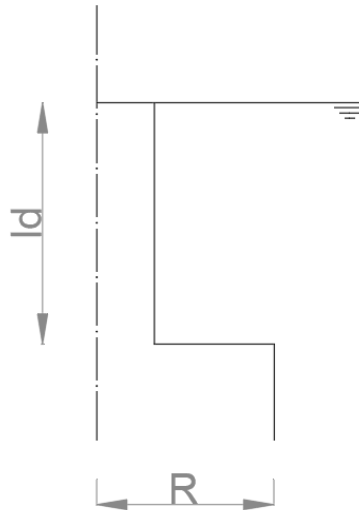


Figure 59 : Anomalie en $\xi=0$

Pour une extension de fût du pieu, la position de l'anomalie n'impacte pas la rigidité lorsque la base n'est pas prise en compte. Si une base supplémentaire existe, alors celle-ci aura un impact plus important sur la rigidité en tête lorsque l'anomalie est proche de la surface du sol.

2.7 Variation de l'empreinte de l'anomalie

Pour conserver une anomalie centrée en $\zeta=0,5$, l'empreinte ainsi que la position varient. Les différentes empreintes étudiées sont les suivantes :

- $\lambda= 0,1$ avec $\zeta= 0,45$
- $\lambda= 0,5$ avec $\zeta= 0,25$
- $\lambda= 0,8$ avec $\zeta= 0,1$

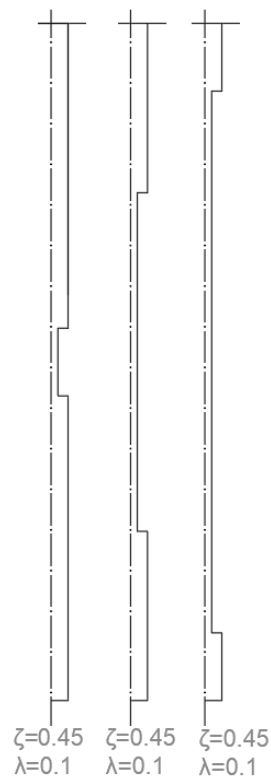


Figure 60 : Empreintes pour une anomalie rectangulaire

L'amplitude de l'anomalie varie de $\xi=0$ à 2.

2.7.1 Résultats

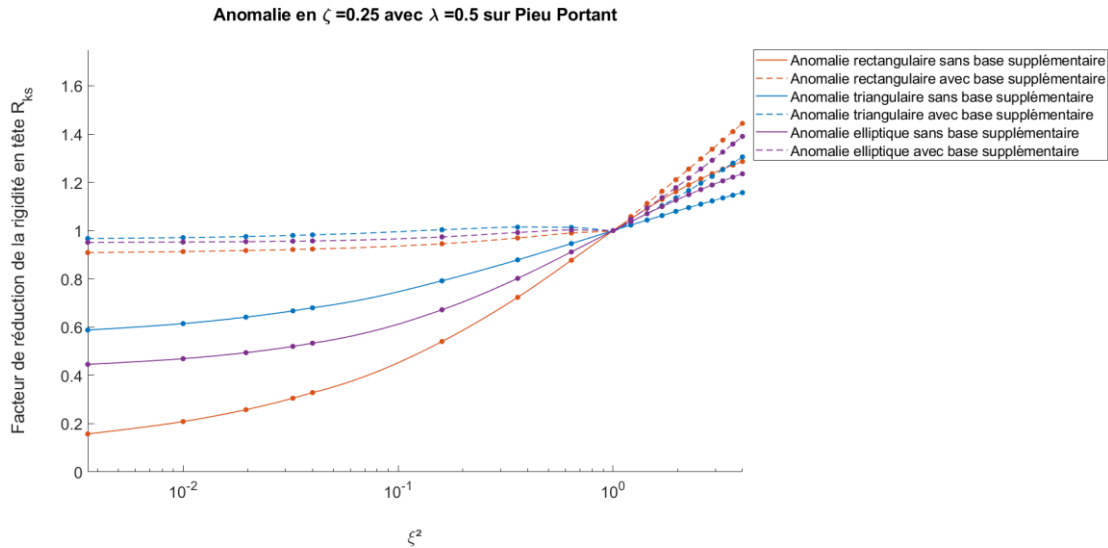


Figure 61 : Variation de l'empreinte pour un pieu portant en $\zeta=0,25$ et $\lambda=0,5$

L'anomalie étant plus grande, la forme aura une influence lorsqu'il s'agit d'une extension.

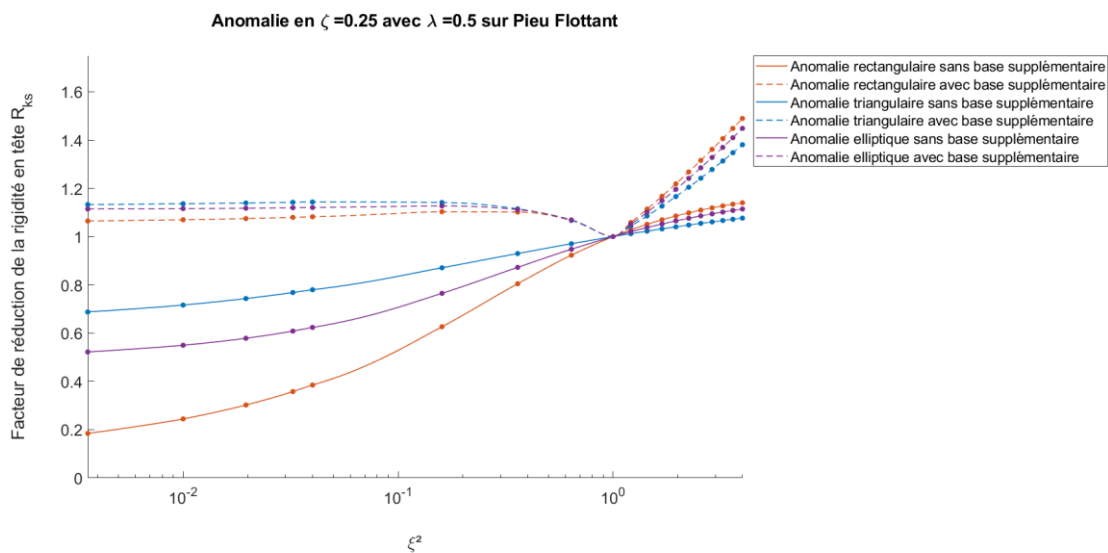


Figure 62 : Variation de l'empreinte pour un pieu flottant en $\zeta=0.25$ et $\lambda=0.5$

Qu'importe la position de l'anomalie, la forme elliptique est au milieu des deux autres formes. Cela se confirme par les graphes en Annexe B pour des positions en $\zeta=0,45$ et $\zeta=0,1$ et pour une empreinte respectivement de $\lambda=0,1$ et $\lambda=0,8$. L'anomalie elliptique est utilisée pour comparer les résultats lorsque l'empreinte de l'anomalie varie.

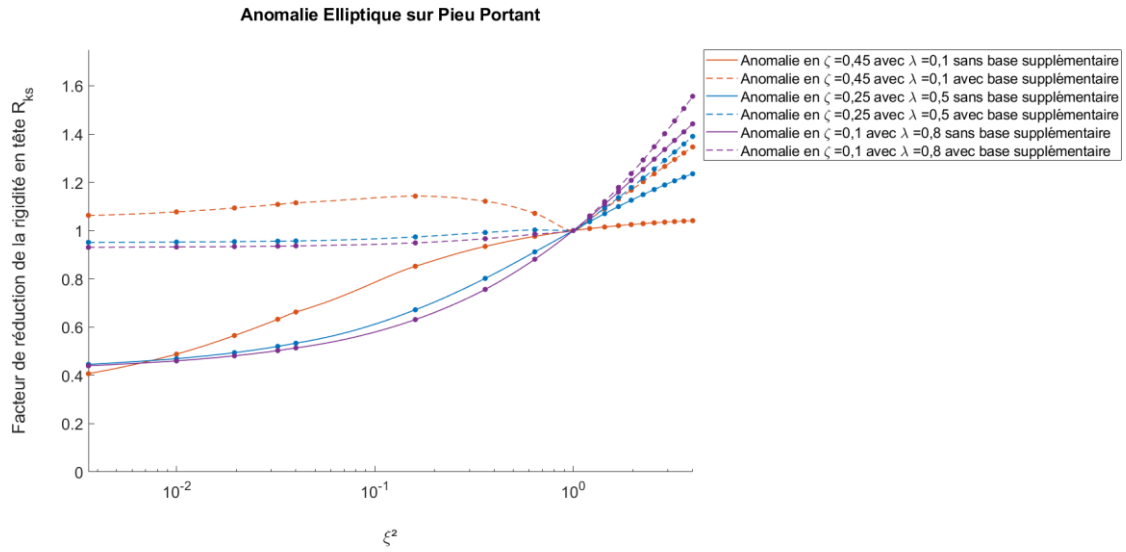


Figure 63 : Variation de l'empreinte pour un pieu portant de forme elliptique

Le croisement vient de la réduction de section plus importante pour une anomalie rectangulaire. En effet lorsque l'amplitude vaut 0, l'anomalie triangulaire et elliptique décroissent sur $l_d/2$ avant d'atteindre une section nulle tandis que la rectangulaire attend 0 dès z_d . Elles ont alors une rigidité supplémentaire grâce au béton restant sur le $l_d/2$.

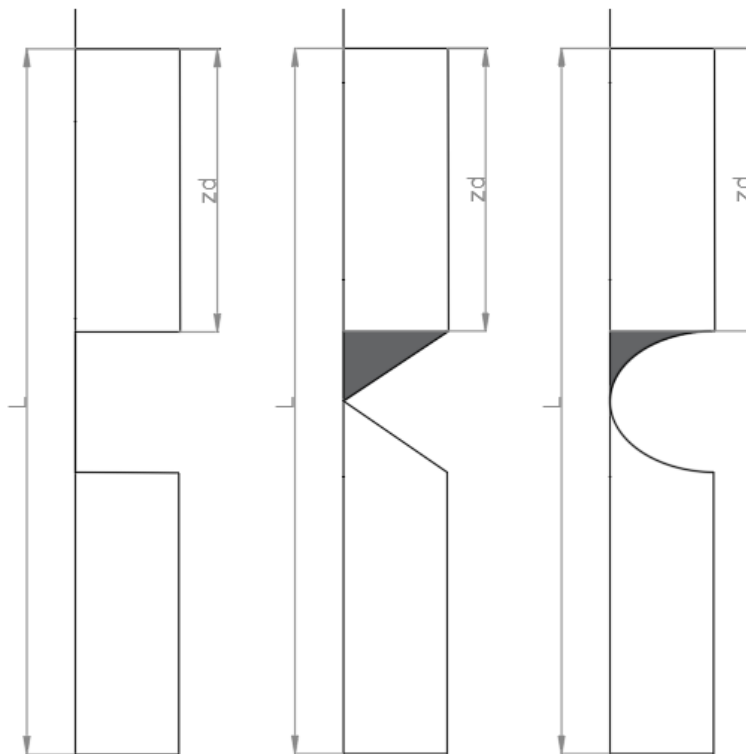


Figure 64 : Amplitude de $\xi=0$ pour différentes formes

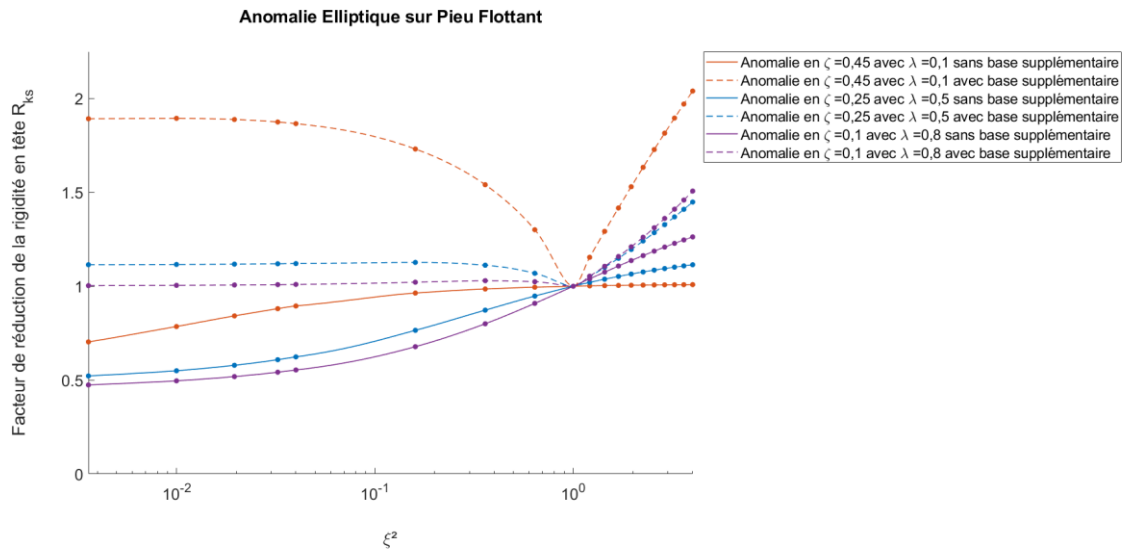


Figure 65 : Variation de l’empreinte pour un pieu flottant de forme elliptique

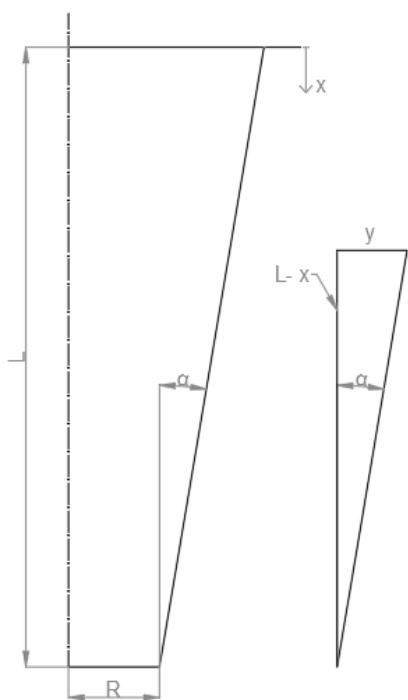
Un pieu flottant sera moins impacté par une perte de rigidité lié à une anomalie mais la base supplémentaire augmente plus la rigidité.

Plus l’empreinte de l’anomalie est grande, plus la rigidité de la tête de pieu sera réduite.

La base supplémentaire aura un impact plus important sur une anomalie dont l’empreinte est plus petite car la base sera plus proche de la tête de pieu.

Les mêmes conclusions sont observées pour les formes rectangulaire et triangulaires dont les graphes se trouvent en annexe B.

2.8 Pieu tapered



$$\tan\alpha = \frac{y}{L-x} \Leftrightarrow y = \tan\alpha * (L-x)$$

La section du pieu à une profondeur x à partir du haut de l’anomalie vaut :

$$Section\ du\ pieu_{en\ x} = (R + (L-x)\tan\alpha)^2 * \pi$$

Figure 66 : Pieu tapered

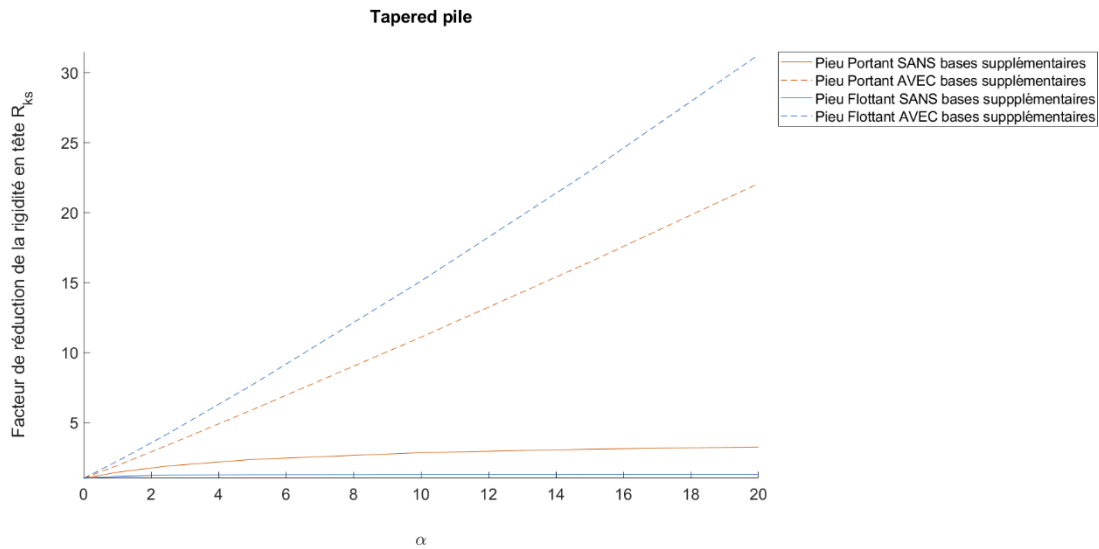


Figure 67 : Résultats pieu tapered

Un pieu tapered a une augmentation de rigidité en tête de pieu grâce à son évasement. Lorsque les bases supplémentaires ne sont pas prises en compte, la réduction de la rigidité en tête de pieu tend vers une limite au fur et à mesure que le pieu est de plus en plus évasé. Avec les bases supplémentaires, la rigidité en tête de pieu augmente linéairement.

2.9 Anomalie matérielle

Les graphes de Poulos sont définis avec F_{si} en abscisse. F_{si} dépendant de E_d/E et A_d/A , que l'on change un des deux facteurs, le graphe sera similaire. En effet si F_{si} vaut une certaine valeur après avoir changé A_d ou la même valeur en changeant E_d , l'ordonnée sera identique.

On peut donc conclure qu'une anomalie matérielle se situant proche de la tête de pieu aura plus d'impact qu'une anomalie formée plus profonde. Et une anomalie dont l'empreinte est plus grande influencera plus négativement qu'une empreinte plus petite.

Simulations numériques

Cette partie est consacrée à l'étude numérique des pieux comportant une anomalie. Les résultats permettront de mettre en évidence l'influence de la position, de l'empreinte et de l'amplitude des anomalies sur les courbes de charge-déplacement suivant une approche différente de celle développée précédemment.

Une seule forme d'anomalie est étudiée par rapport à la section précédente. Il s'agit de la forme rectangulaire car la perte de section y est la plus défavorable et car sa modélisation numérique est plus aisée. En effet, une courbe est difficilement traçable dans le logiciel utilisé, ne permettant ainsi pas de considérer une anomalie elliptique.

Seule l'anomalie géométrique est analysée et le pieu est modélisé dans un sol sableux.

Le logiciel utilisé pour observer l'influence d'anomalies dans un pieu est Plaxis 2D qui utilise les éléments finis. Il permet d'utiliser plusieurs lois de comportement et d'introduire des interfaces.

3.1 Données

Pour rester cohérent avec la partie précédente du travail, le pieu aura une longueur de 10m et un diamètre de 0,5m. Il est constitué de béton C25/30 et il est coulé dans un sol sableux.

Pour le béton et le sable, les données sont les suivantes :

	E [MPa]	ν [/]	$\gamma_{\text{saturé}}$ [kN/m ³]	$\gamma_{\text{insaturé}}$ [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ [°]	ψ [°]
	EL & MC	EL & MC	EL & MC	EL & MC	MC	MC	MC
Béton	20*10 ³	0,2	25	25	4960	48	0
Sable	13,33	0,3	20	18	0,2	35	5

Tableau 4 : Données des simulations numériques

Les données du béton sont reprises de l'article de Petek and al. de 2002 (7). L'angle de dilatance du sable est calculé via $\psi = \phi - 30^\circ$.

Les simulations seront exécutées pour trois positions et trois empreintes différentes. En tout, six géométries seront étudiées :

- $\lambda=0,1$ avec $\zeta=0$
- $\lambda=0,1$ avec $\zeta=0,4$
- $\lambda=0,1$ avec $\zeta=0,8$
- $\lambda=0,1$ avec $\zeta=0,45$
- $\lambda=0,5$ avec $\zeta=0,25$
- $\lambda=0,8$ avec $\zeta=0,1$

Pour chacune des géométries, l'amplitude de l'anomalie varie avec $\xi = 0 ; 0,06 ; 0,1 ; 0,14 ; 0,18 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 ; 1 ; 1,1 ; 1,2 ; 1,3 ; 1,4 ; 1,5 ; 1,6 ; 1,7 ; 1,8 ; 1,9 ; 2$.

Les interfaces entre le béton et le sol ont une rigidité de $R_{\text{inter}} = 2/3$, il s'agit de la valeur conseillée par Plaxis.

Deux lois de comportement sont utilisées dans cette partie :

- 1) La loi de Hooke d'une élasticité isotropique linéaire pour un comportement élastique (EL)
- 2) La loi de Mohr-Coulomb pour un comportement linéaire élastique parfaitement plastique (MC)

Pour la première, Plaxis n'a besoin que du module d'élasticité E , du coefficient de Poisson ν , des masses volumiques $\gamma_{\text{saturé}}$ et $\gamma_{\text{insaturé}}$ comme valeur tandis que pour la deuxième il a également besoin de la cohésion c , de l'angle de frottement ϕ et de l'angle de dilatance ψ .

3.2 Elaboration du modèle

Trois cas sont étudiés dans cette partie :

- Le béton et le sol sont en élastique linéaire et nous restons dans le domaine élastique des deux matériaux ;
- Le béton reste en élastique linéaire mais le sol est modélisé en Mohr-Coulomb afin d'observer la rupture dans le sol ;
- Le béton et le sol sont en Mohr-Coulomb pour observer la rupture dans le béton et dans le sol.

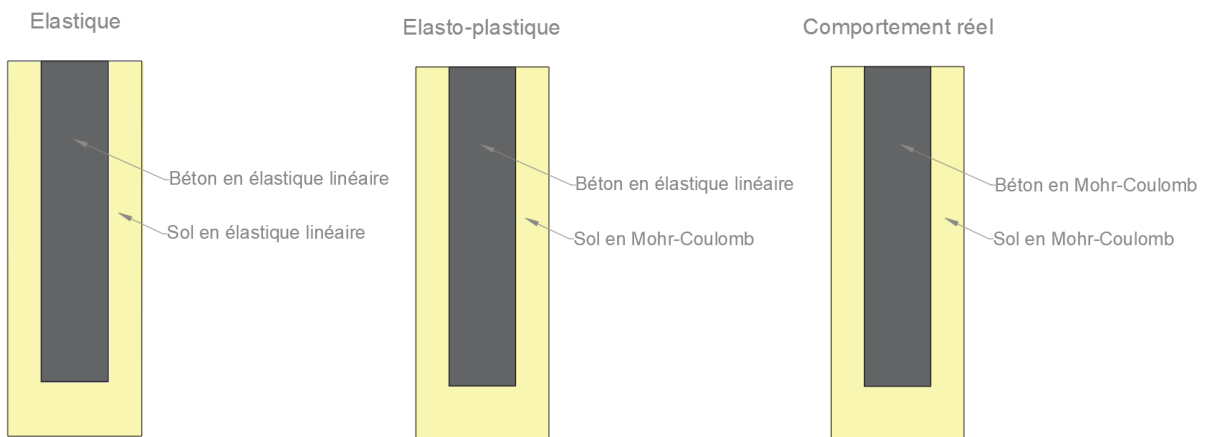


Figure 68 : Cas étudiés avec Plaxis

Les simulations sont réalisées en 2D avec l'hypothèse d'axisymétrie. Le maillage utilisé est un 15 nœuds, c'est le type de maillage conseillé par Plaxis pour les modélisations axisymétriques. Le maillage étant défini par les limites du modèle, celles-ci sont les plus proches du pieu afin que le maillage soit le plus précis possible. Il faut toutefois conserver assez de sol sous et à côté du pieu pour éviter des concentrations de contraintes aux conditions limites. Les contours sont donc fixés à 5m au-delà du diamètre maximal que peut avoir le pieu ($2 \cdot D$), soit 6m, et à 5m sous la base du pieu, soit 15m. La figure ci-dessous montre les propriétés du modèle ainsi que les unités utilisées par Plaxis.

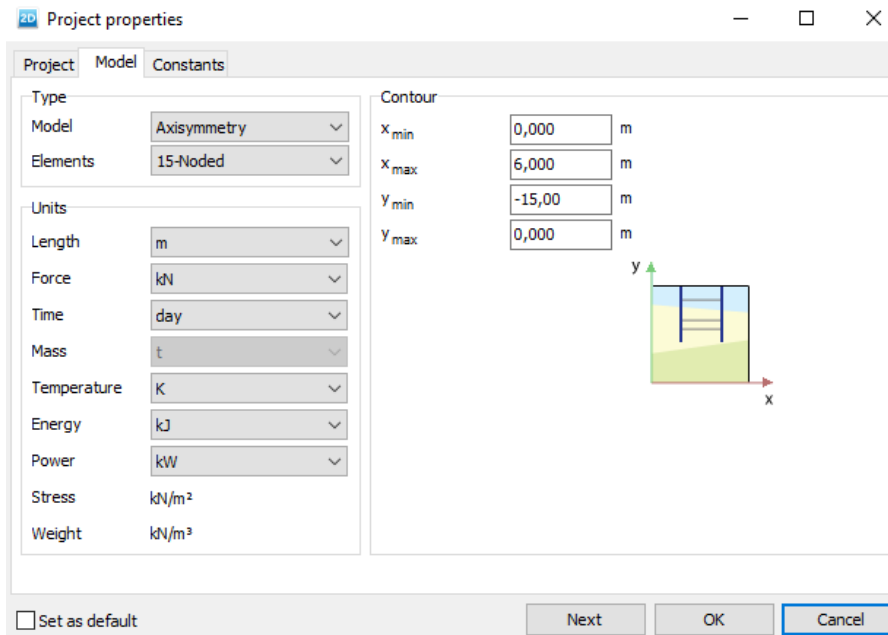


Figure 69 : Propriétés du projet Plaxis

La limite verticale est fixe dans la direction horizontale et libre dans la direction verticale tandis que la limite horizontale est fixe dans les deux directions. Les unités et les constantes sont définies par défaut selon Plaxis.

3.2.1 Sol

Les sols sont ensuite définis avec les données de la section 3.1. Le béton et le sable sont drainés, les autres valeurs sont calculées automatiquement. R_{inter} est la valeur d'interface définie en 0,6667.

Un forage est créé avec le sable comme matériau pour définir la stratigraphie du sol. Il s'étend de 0m à -15m et prend toute la largeur du modèle. La nappe phréatique est fixée en -35m pour considérer le sol insaturé et ne pas tenir compte des pressions interstitielles.

3.2.2 Structure

Un premier polygone rectangulaire est défini de (0 ; 0) à (0,25 ; -10) et le matériau béton y est assigné. Un second polygone rectangulaire modélise l'anomalie et le matériau sable y est affecté. C'est ce rectangle qui est transformé en fonction de l'amplitude, de la position et de l'empreinte de l'anomalie. Sur l'image ci-dessous, l'anomalie est donc située en $\zeta=0,4$ avec une empreinte de $\lambda=0,1$.

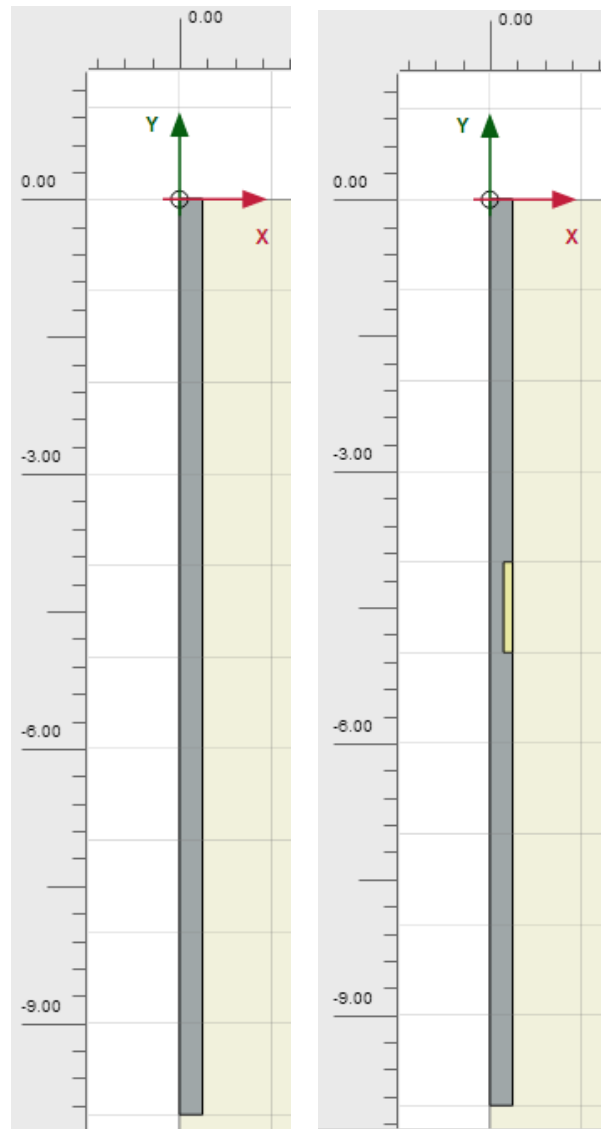


Figure 70 : Polygones représentant le pieu et l'anomalie

Les interfaces sont placées entre le sol et le béton pour modéliser l'interaction entre les deux. Elles sont étendues de 0,2 m pour éviter des oscillations de contraintes aux coins des structures. Sur la première figure ci-dessous, les interfaces sont représentées pour toute la longueur du pieu. Les deux autres figures permettent de constater avec plus de précision les interfaces au niveau de l'anomalie lorsque celle-ci est une extension et une striction.

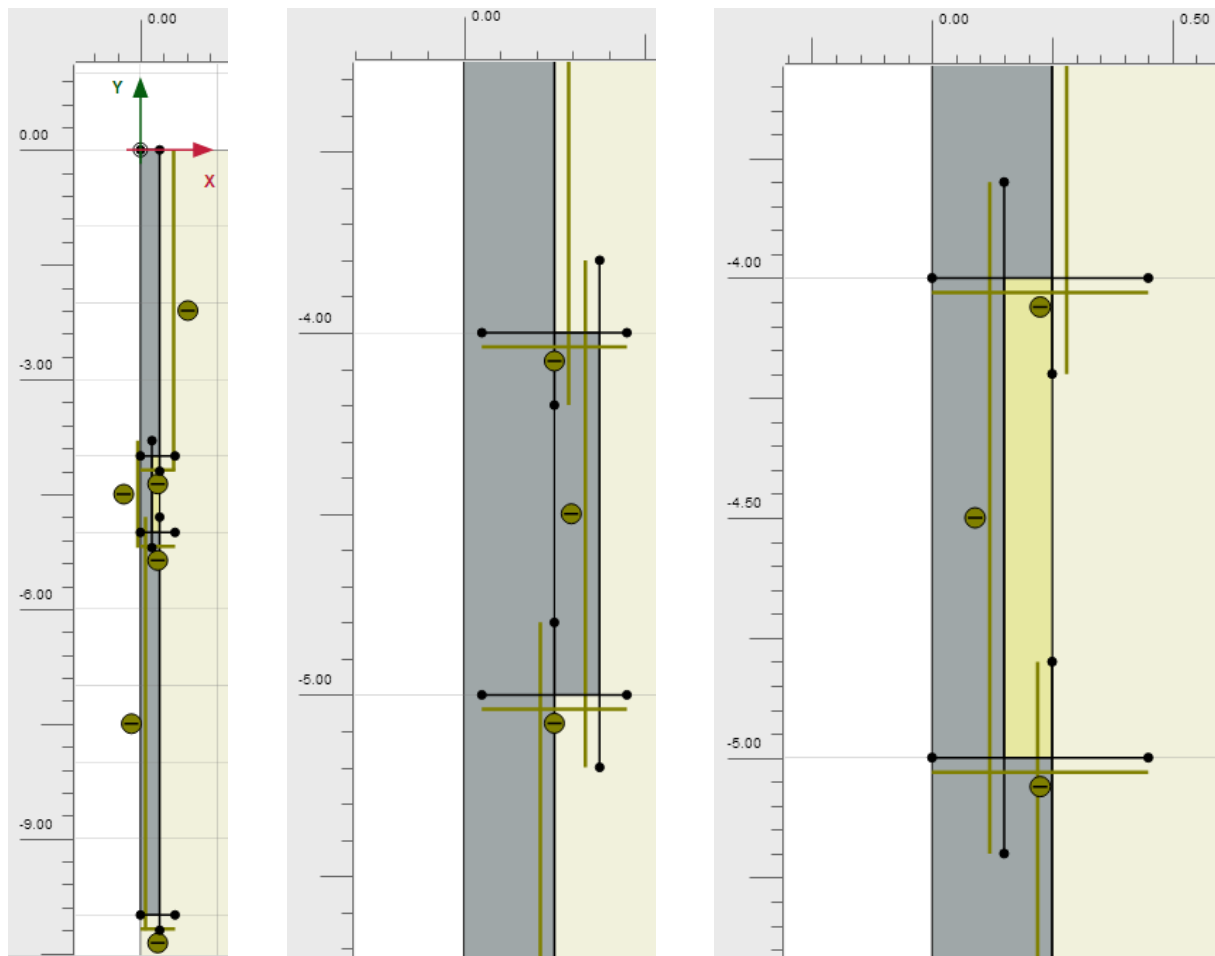


Figure 71 : Géométries des interfaces sur Plaxis

Un déplacement uniforme en tête de pieu est appliqué. Pour atteindre la rupture, le déplacement imposé est fixé à 10% du diamètre du pieu, soit 0,05 m. Excepté pour l'anomalie en $\zeta=0$, le déplacement est attribué sur toute la surface de la tête de pieu. Si l'anomalie est en surface, le déplacement est placé exclusivement sur la partie béton de la tête de pieu.

3.2.3 Maillage

La géométrie est divisée en éléments finis pour les calculs. Le maillage doit être suffisamment fin pour être précis mais pas trop pour éviter un temps de calcul trop long. Pour la suite du travail, un maillage moyen est utilisé. La génération du maillage est basée sur une procédure de triangulation et prend en compte le sol, les objets structuraux, les charges ainsi que les conditions frontières.

La taille des éléments est définie par les conditions limites du modèle. Un raffinement automatique est réalisé par Plaxis lorsque la distance entre 2 points est faible ou lorsque les angles impliquent des discontinuités. Il est caractérisé par un facteur de grossissement³ local valant 0,5 par anomalie. La taille des éléments diminue donc de moitié. La Figure 72 montre le maillage pour l'entièreté du projet tandis que la Figure 73 montre le maillage autour d'une anomalie. A gauche il s'agit d'une extension et à droite d'une striction.

³ Facteur par lequel la taille des éléments est multipliée

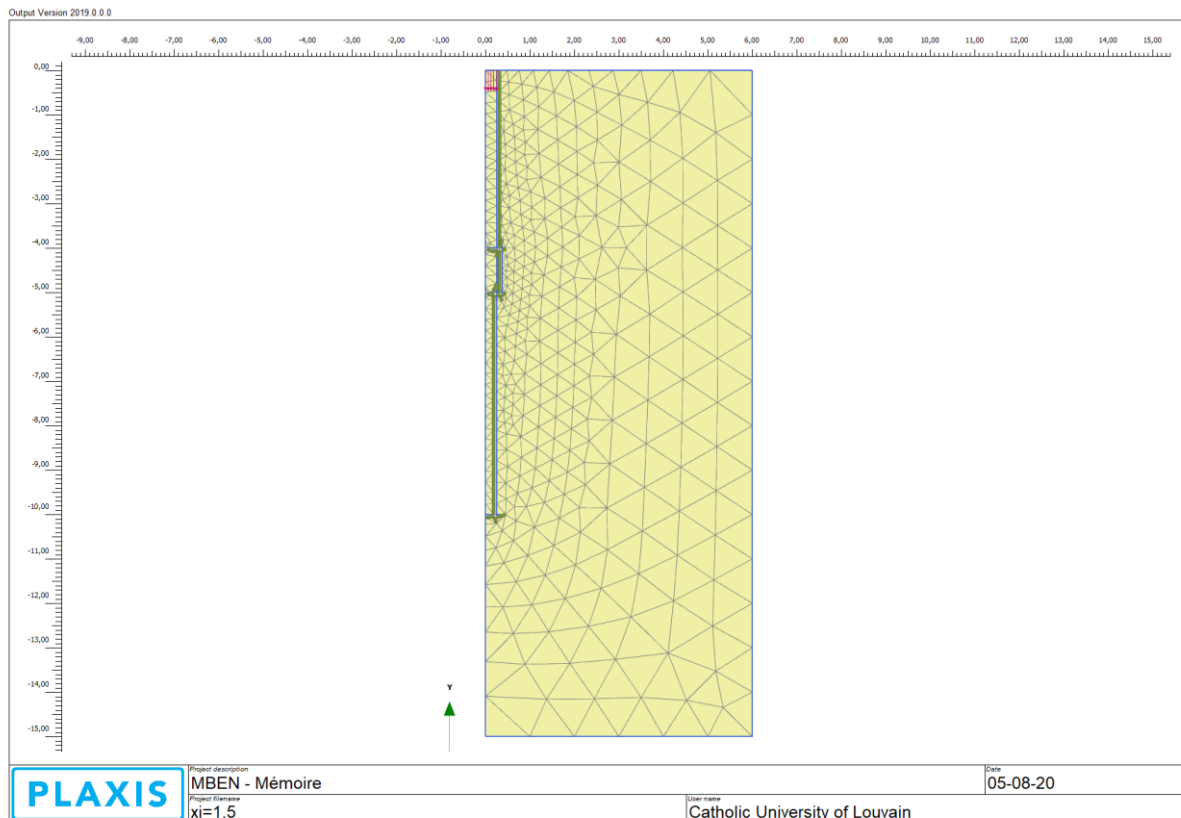


Figure 72 : Maillage global pour une extension

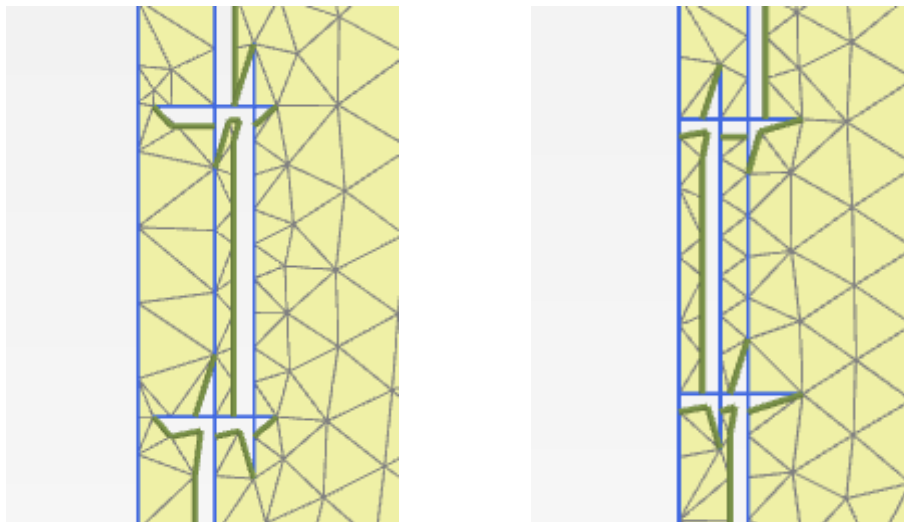


Figure 73 : Maillage au niveau de l'anomalie pour une extension et une striction respectivement

3.2.4 Conditions d'écoulement

La nappe phréatique étant définie sous le modèle et les matériaux étant drainants, cette partie n'est pas modifiée.

3.2.5 Construction par étapes

Certaines parties du modèle géométrique peuvent être activées/désactivées et les propriétés peuvent être modifiées. Dans la phase initiale, le matériau sol est activé pour le polygone représentant l'anomalie et le matériau béton est activé pour le polygone représentant le pieu. Cette phase est représentée ci-dessous par la première image, les interfaces et le déplacement sont grisés et donc désactivés. Une seconde phase est ajoutée où les matériaux sont de nouveaux assignés comme dans la phase initiale. Dans cette phase, le déplacement imposé ainsi que les interfaces sont activés. Il s'agit de la deuxième image où les interfaces sont en vert et le déplacement en rose.

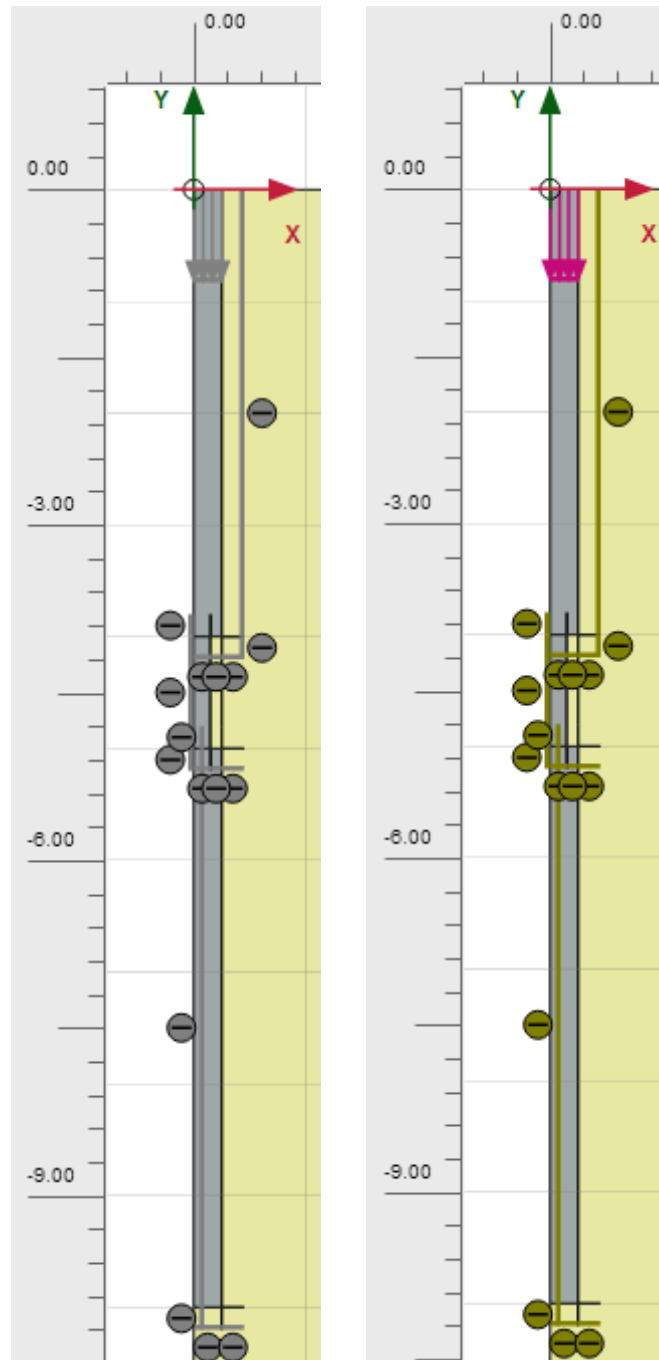


Figure 74 : Activation/désactivation dans la construction par étapes

Le déplacement du pieu ainsi que la force appliquée en tête veulent être connus pour le centre de la tête du pieu. Le point (0 ;0) est donc présélectionné pour que les résultats y soient plus précis. Il est représenté sur la figure ci-dessous.

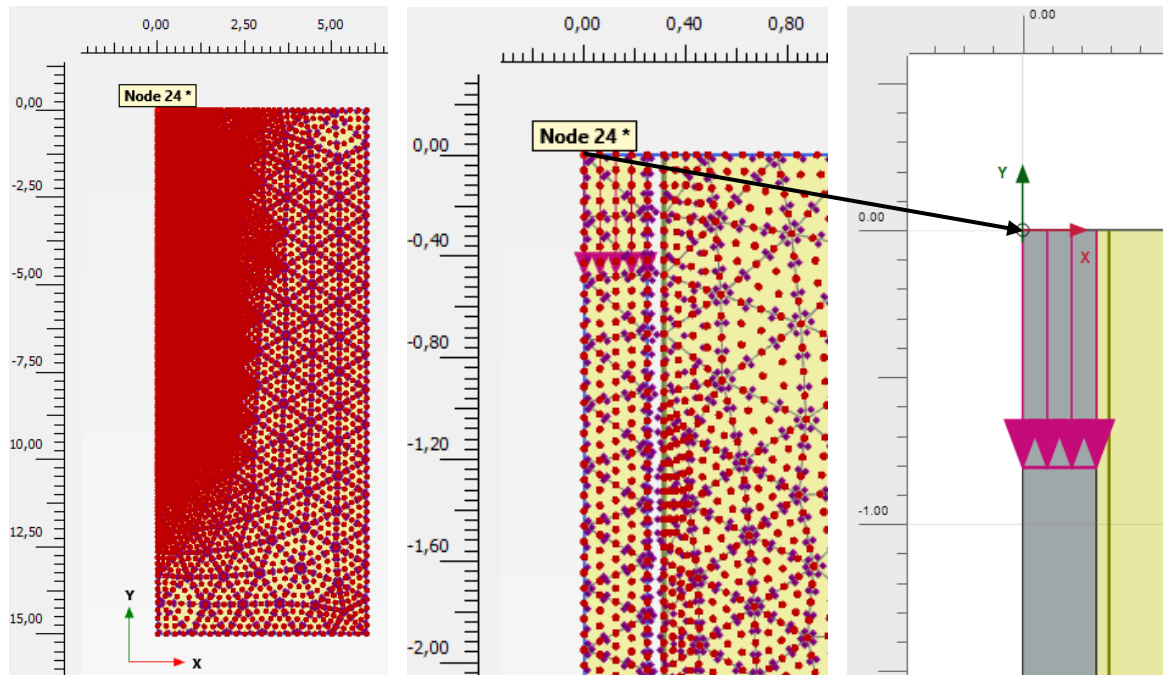


Figure 75 : Point (0 ;0) où le déplacement veut être connu

Le projet est ensuite calculé en mode construction par étapes.

3.2.6 Output

Après le calcul des phases, « l'output » de Plaxis peut être affiché. Cette fenêtre permet de développer les contraintes, déplacements, déformations, ... des différentes phases du projet. Il est également possible de tracer des graphes des points sélectionnés avant le calcul afin de connaître l'évolution des forces, déplacements, ... en ces points. Sur la figure ci-dessous, les contraintes verticales pour une striction de $\xi=0,6$ sont imagées par une échelle de couleurs.

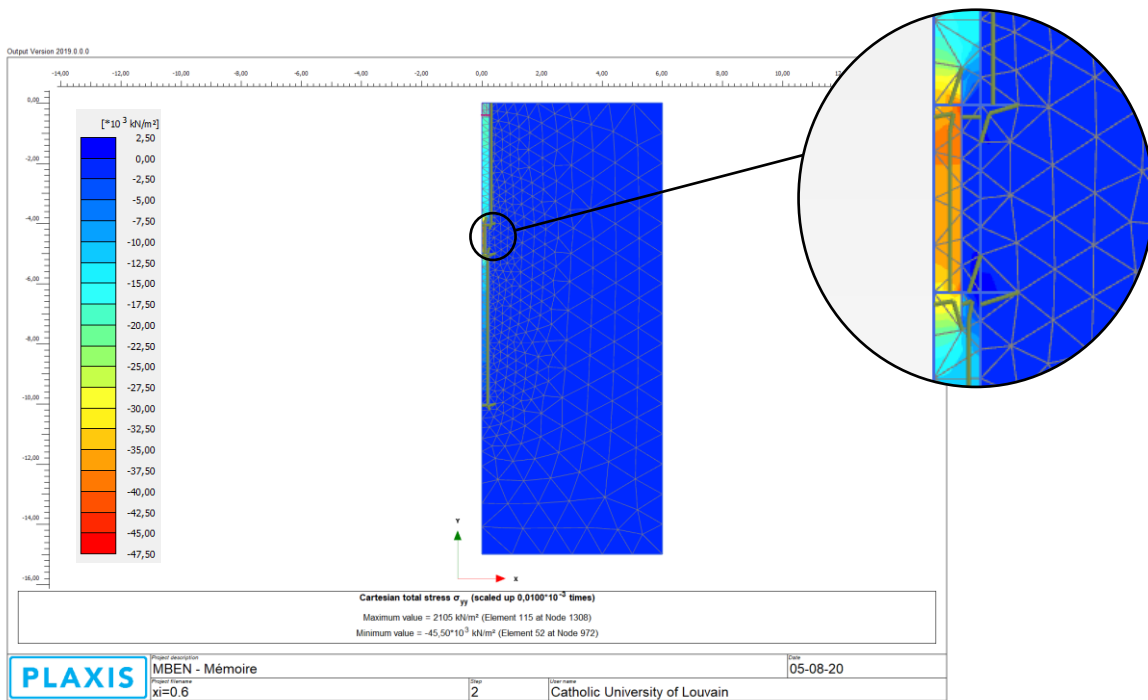


Figure 76 : Distribution de la contrainte verticale pour une striction

La figure ci-dessous montre quant à elle le déplacement total.

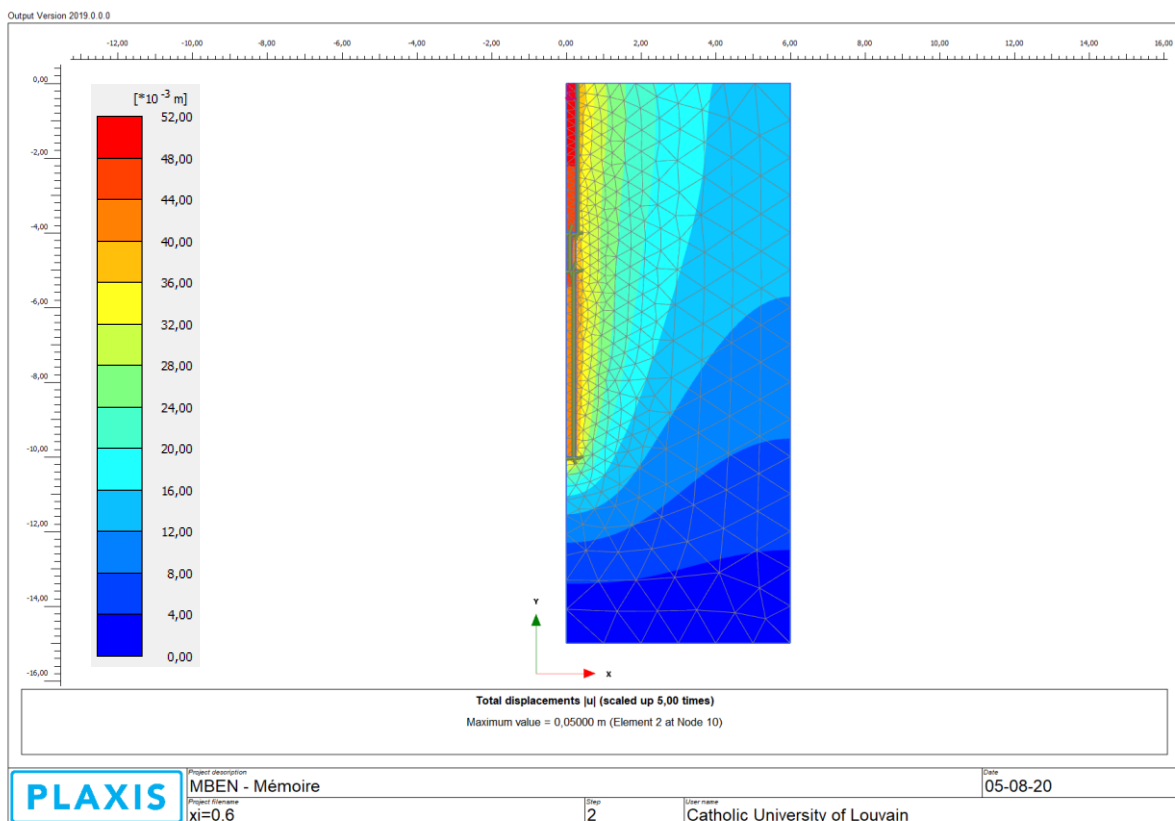


Figure 77 : Distribution du déplacement pour une striction

D'autres résultats sont possibles mais ils ne sont pas nécessaires dans ce travail.

3.3 Cas 1 : Sol et béton en élastique linéaire

Lors de la définition des matériaux, le comportement élastique linéaire est attribué au béton et au sable. Les géométries énoncées en 3.1 sont étudiées en variant l'amplitude de l'anomalie. Pour chaque amplitude de chaque géométrie, le graphe de la force de réaction F_y en (0 ;0) en fonction du déplacement imposé en tête de pieu u_y est créé. Ci-dessous on le trouve pour une striction avec une amplitude de 0,2 mais l'allure est similaire pour une extension et une empreinte plus importante. La pente correspond à la rigidité en tête du pieu.

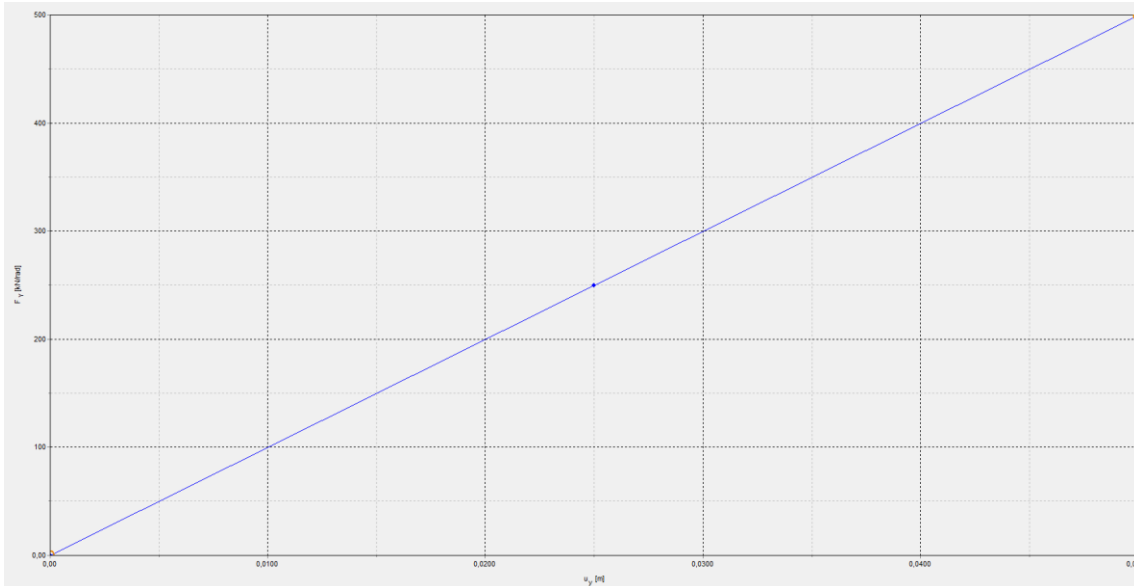


Figure 78 : Allure du graphe en (0 ; 0) pour le cas 1 en Plaxis

Les deux autres cas n'ayant pas des rigidités constantes, les données des différentes géométries sont comparées en prenant la force de réaction en (0 ;0) pour un déplacement de 10% du diamètre du pieu. Cette force est ensuite normalisée par la force de réaction au même point pour un même déplacement mais sur un pieu sain. On définit donc le facteur de réduction de la force en tête de pieu pour un déplacement de 0,05m :

$$F_{ks} = \frac{\text{Force d'un pieu avec anomalie géométrique}}{\text{Force d'un pieu intact}}$$

Ce facteur sera également utilisé pour les deux autres cas.

3.3.1 Résultats

Les matériaux étant définis en élastique linéaire, aucun point du modèle n'atteint la plasticité. En observant la déformation incrémentale en cisaillement, il est possible d'observer les zones où le modèle se déforme le plus. Ces zones sont plus facilement perceptibles en adaptant l'échelle en logarithmique avec une base 3. Cette différence est observable sur la figure ci-dessous.

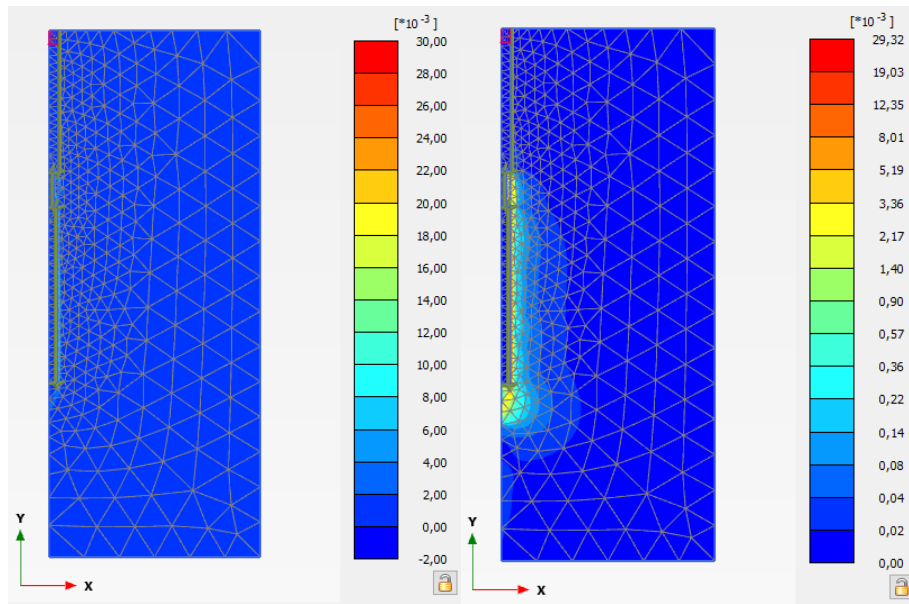


Figure 79 : Différence de perception entre une échelle normale et logarithmique

Pour une striction d’amplitude $\xi=0,2$, le cisaillement est donné sur la figure suivante. Il est fortement présent dans le haut de l’anomalie et en base du pieu.

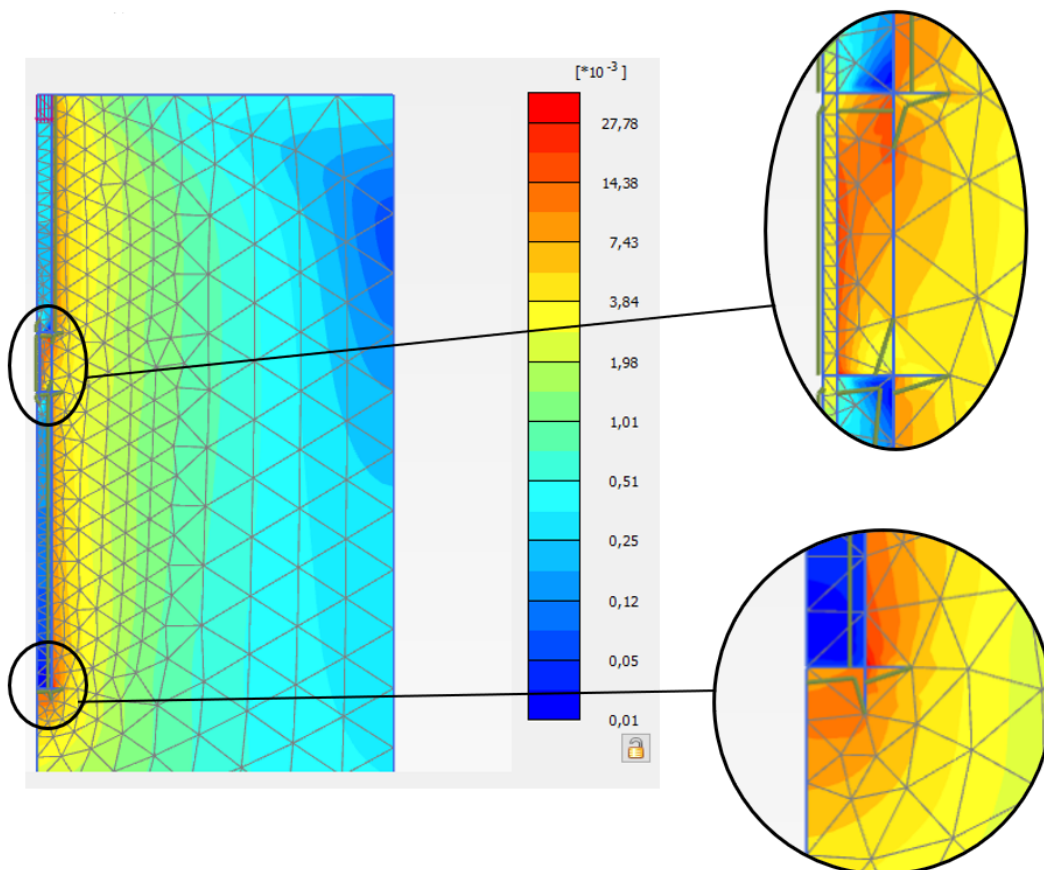


Figure 80 : Striction $\xi= 0,2$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 1 Plaxis

Pour une empreinte plus importante, le cisaillement sera plus faible en base de pieu car il sera davantage repris dans l’anomalie comme la figure suivante permet de le constater.

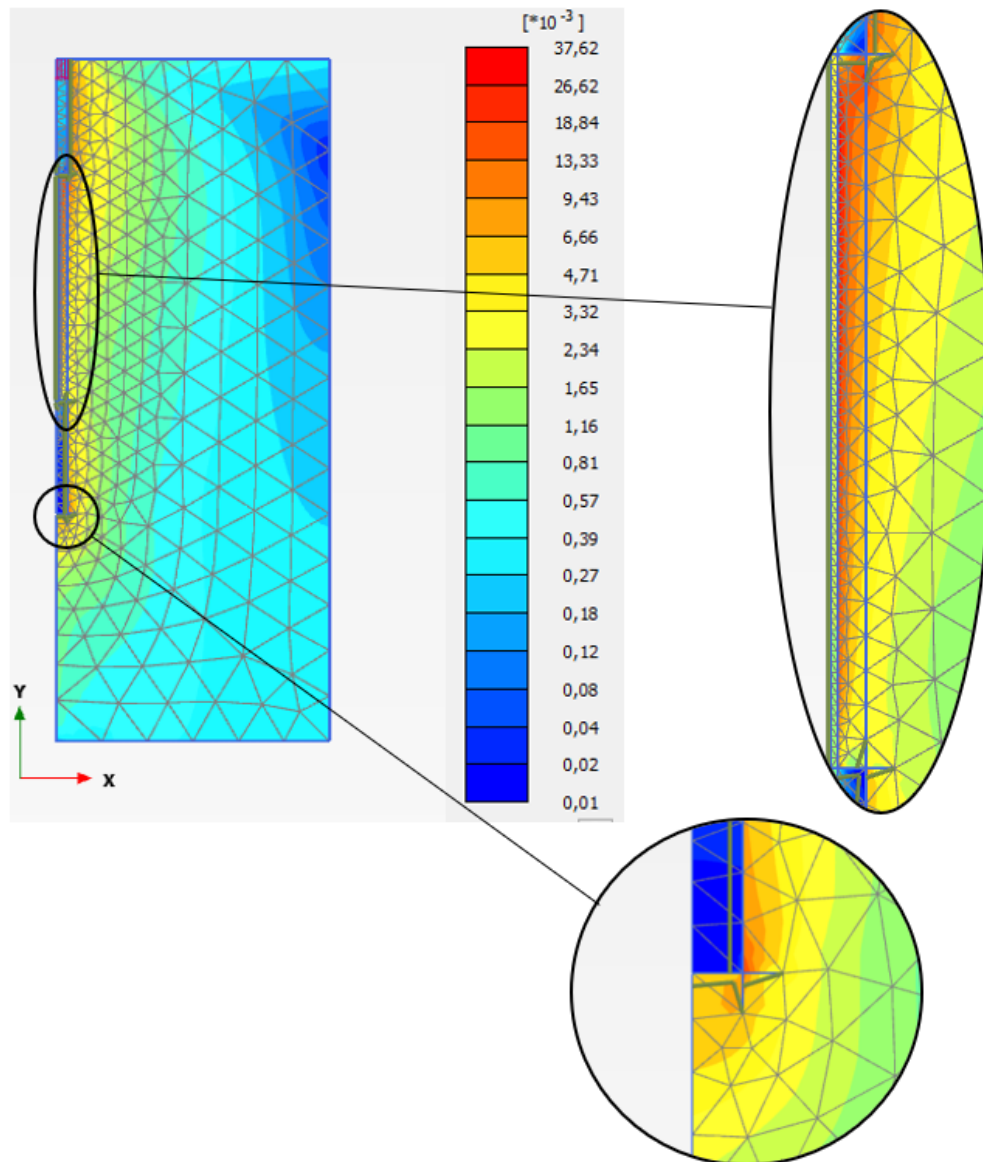


Figure 81 : Striction $\xi=0,2$ en $\zeta=0,25$ et $\lambda=0,5$ pour le cas 1 Plaxis

Pour une extension d'amplitude $\xi=1,4$, le cisaillement est présent tout le long de l'anomalie ainsi qu'à la base comme le montre la Figure 82. C'est également le cas pour une empreinte plus importante.

L'évolution du cisaillement pour toutes les amplitudes et géométries étudiées est schématisée dans l'Annexe C.

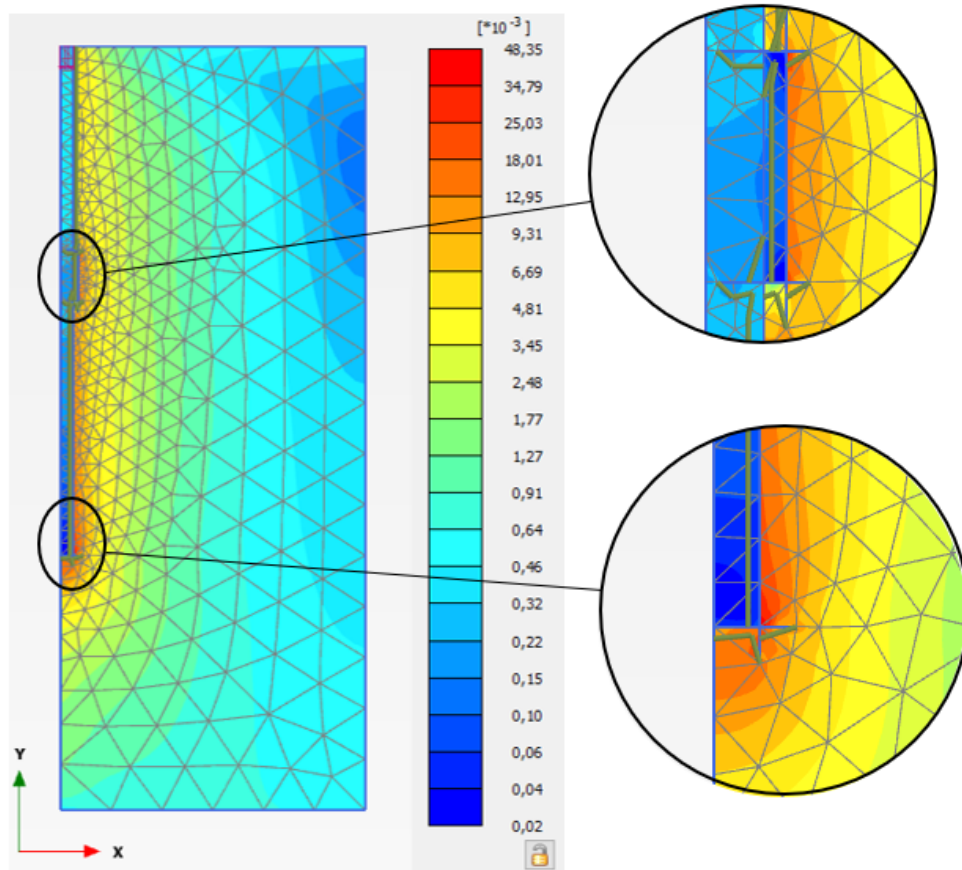


Figure 82 : Extension $\xi = 1,4$ en $\zeta = 0,4$ et $\lambda = 0,1$ pour le cas 1 Plaxis

Les graphes suivants montrent l'évolution de la force nécessaire pour atteindre un déplacement de 0,05 m en tête de pieu pour des amplitudes de $\xi = 0$ à 2 et pour trois positions et empreintes différentes de l'anomalie.

3.3.1.1 Variation de la position

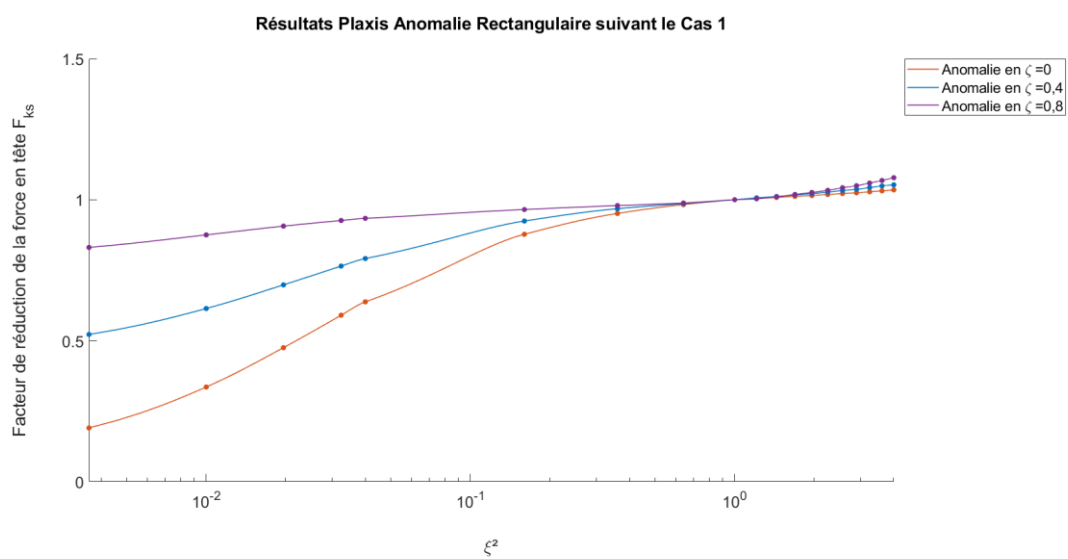


Figure 83 : Variation de la position pour le cas 1 en Plaxis

Le graphe ci-dessus compare la position de l'anomalie pour différentes amplitudes. Il indique qu'une striction proche de la base du pieu aura besoin de moins de force pour atteindre le déplacement qu'une striction proche de la tête de pieu. Cela se traduit par une rigidité en tête de pieu qui diminue lorsque l'anomalie est proche de la surface.

Pour une extension, F_{ks} augmente davantage avec une anomalie proche de la base. L'extension crée une deuxième base où le pieu transmet une partie de la charge au sol.

3.3.1.2 Variation de l'empreinte

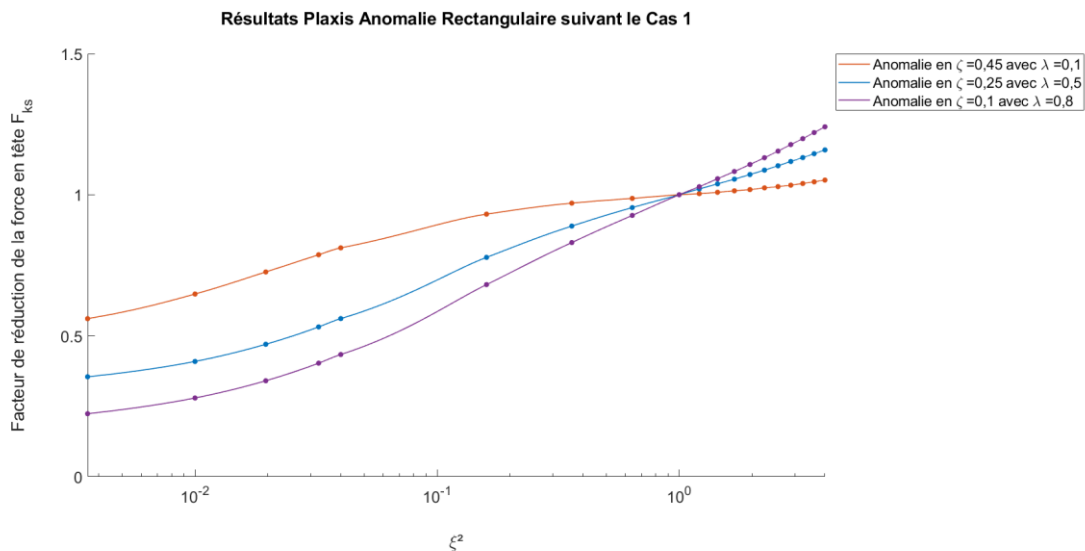


Figure 84 : Variation de l'empreinte pour le cas 1 en Plaxis

Le graphe ci-dessus compare l'empreinte de l'anomalie pour plusieurs amplitudes. Les empreintes sont centrées en $\zeta=0,5$ c'est-à-dire au centre de la longueur du pieu. Une empreinte plus longue impactera davantage la force nécessaire pour une striction ; le facteur F_{ks} est donc plus faible. En revanche, c'est l'inverse pour une extension, la force nécessaire sera plus importante lorsque l'empreinte est plus grande. Cette rigidité est apportée par la section de béton qui est plus conséquente sur une plus grande hauteur.

3.3.2 Comparaison avec le modèle à ressorts

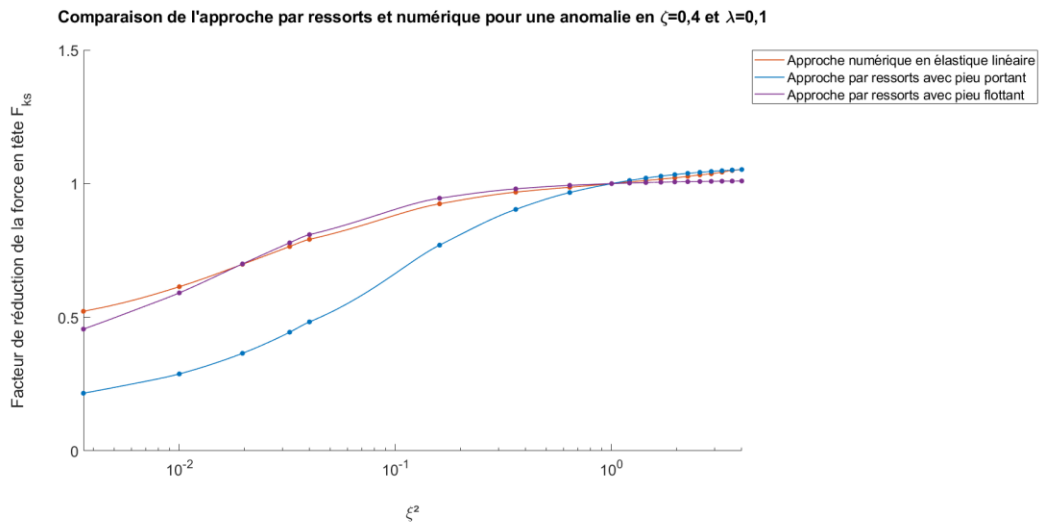


Figure 85 : Comparaison de l'approche par ressorts et numérique

En comparant avec le modèle à ressorts, l'allure des résultats Plaxis ressemble davantage à l'allure d'une anomalie rectangulaire sur pieu flottant.

Pour vérifier que Plaxis considère bien les pieux comme flottant dans le modèle utilisé pour les modélisations, un pieu sain est créé. Le même déplacement uniforme de 0,05 m est appliqué et le pieu est également défini par un polygone rectangulaire dont le matériau béton y est assigné. Mais cette fois-ci, les points choisis pour les graphes sont les « stress points » en tête et base de pieu.

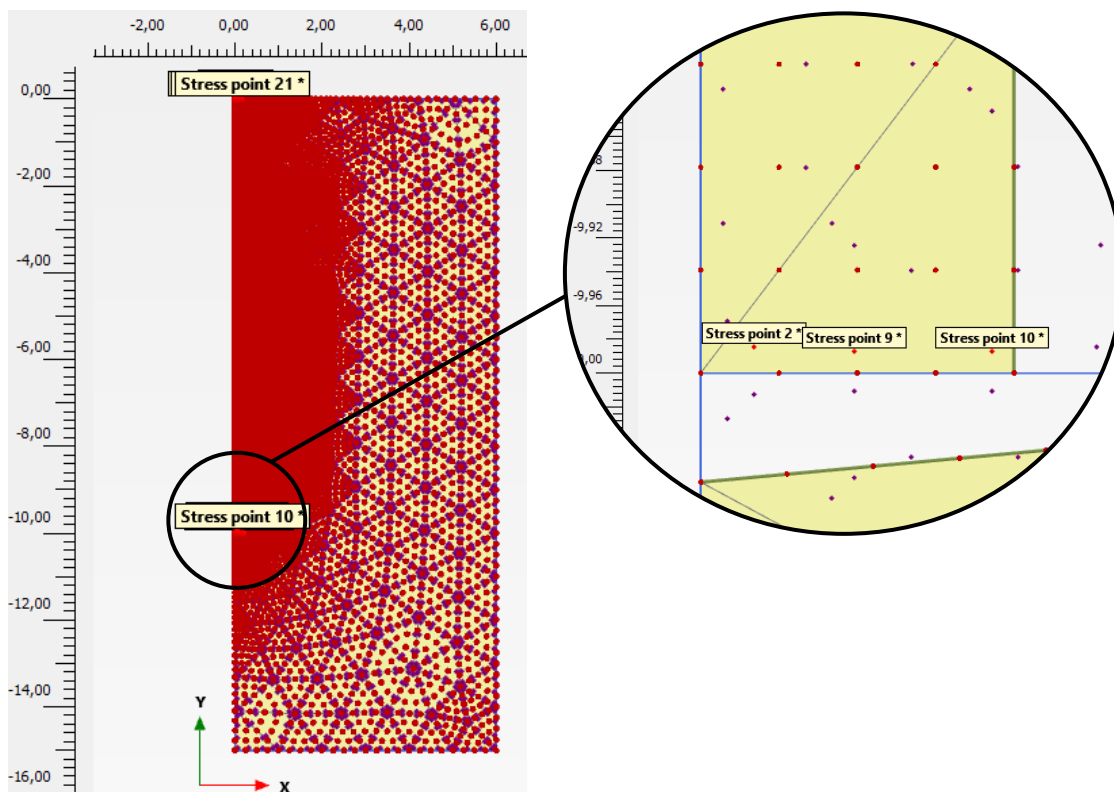


Figure 86 : Stress point en base du pieu

Après calcul, des graphes peuvent être tracés avec la force de réaction en tête de pieu comme abscisse et la contrainte verticale au « stress point » choisis comme ordonnée. La contrainte maximale entre les différents stress point en base de pieu est multipliée par la section du pieu pour obtenir la charge reprise par le sol. Avec cette charge et la charge en tête, il est possible de déterminer la proportion de charge reprise par frottement et à la base avec

$$\frac{Q_{base}}{Q_{base} + Q_{frottement}} \text{ et } \frac{Q_{frottement}}{Q_{base} + Q_{frottement}}$$

La charge totale $Q_{base} + Q_{frottement}$ est de 4172,94 kN tandis que la charge reprise à la base est de 203,23 kN. Le pourcentage est donc de 4,87%, ce qui prouve bien que Plaxis considère le pieu comme flottant puisque 95,13% de la charge est reprise par frottement.

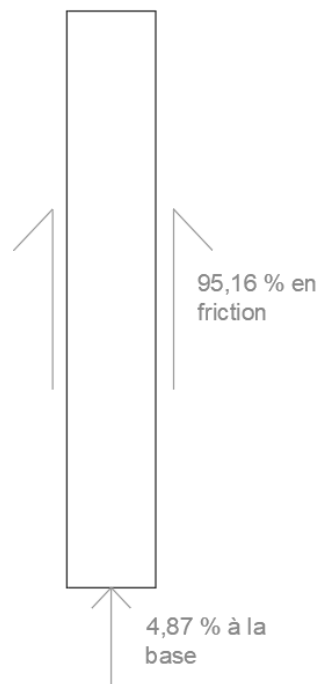


Figure 87 : Reprise des charges en friction et à la base pour le cas 1 Plaxis

Dans la partie sur l'approche par ressort, une base supplémentaire était créée par l'anomalie et permettait d'augmenter la rigidité en tête de pieu. Le graphe ci-dessous montre que Plaxis ne considère pas cette base lorsqu'il s'agit d'une striction. Cependant lorsque le pieu présente un élargissement, la force nécessaire au déplacement imposé augmente. Cela se traduit par une rigidité plus élevée due à une base supplémentaire sous l'anomalie. La rigidité apportée par cette base a cependant été surestimée dans la partie sur l'approche par ressorts.

Comparaison de l'approche par ressorts et numérique pour une anomalie en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$

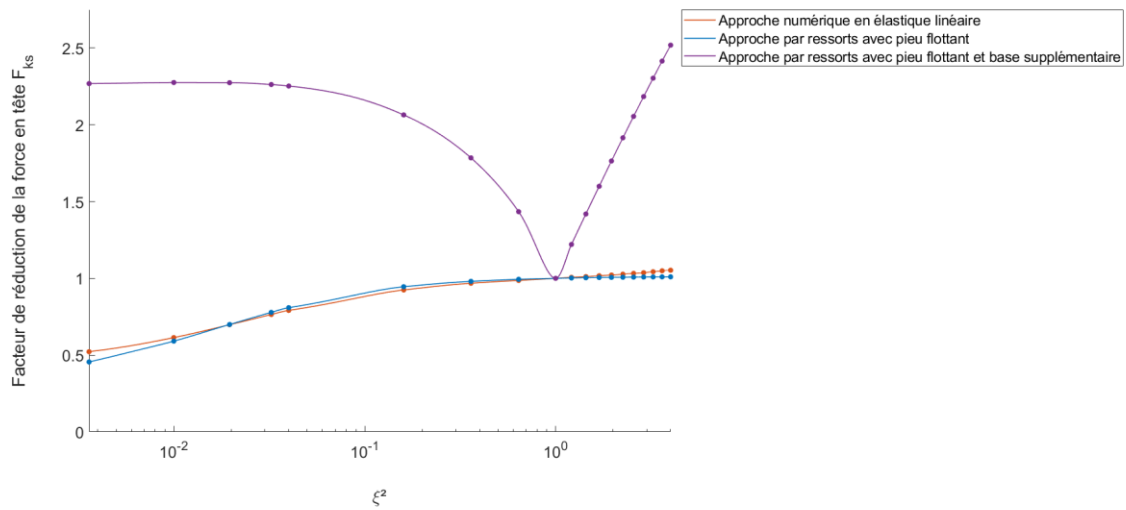


Figure 88 : Comparaison de l'approche par ressorts et numérique avec base supplémentaire

3.4 Cas 2 : Sol en Mohr-Coulomb et béton en élastique linéaire

Pour le deuxième cas, le béton conserve son comportement élastique linéaire mais le sable est défini avec un comportement élasto-plastique. La loi utilisée est celle de Mohr-Coulomb. Pour rappel elle permet de définir la résistance au cisaillement des sols mais également la charge et l'angle de rupture d'une fracture de déplacement dans des matériaux tels que le béton (8).

Les mêmes géométries et amplitudes que le cas précédent sont étudiées. Les graphes sont toujours tracés avec le déplacement en (0 ;0) et la force de réaction mais ils n'auront plus une droite car la rigidité varie en fonction du déplacement. Pour une striction de $\xi=0,2$, le graphe se présente comme ceci :

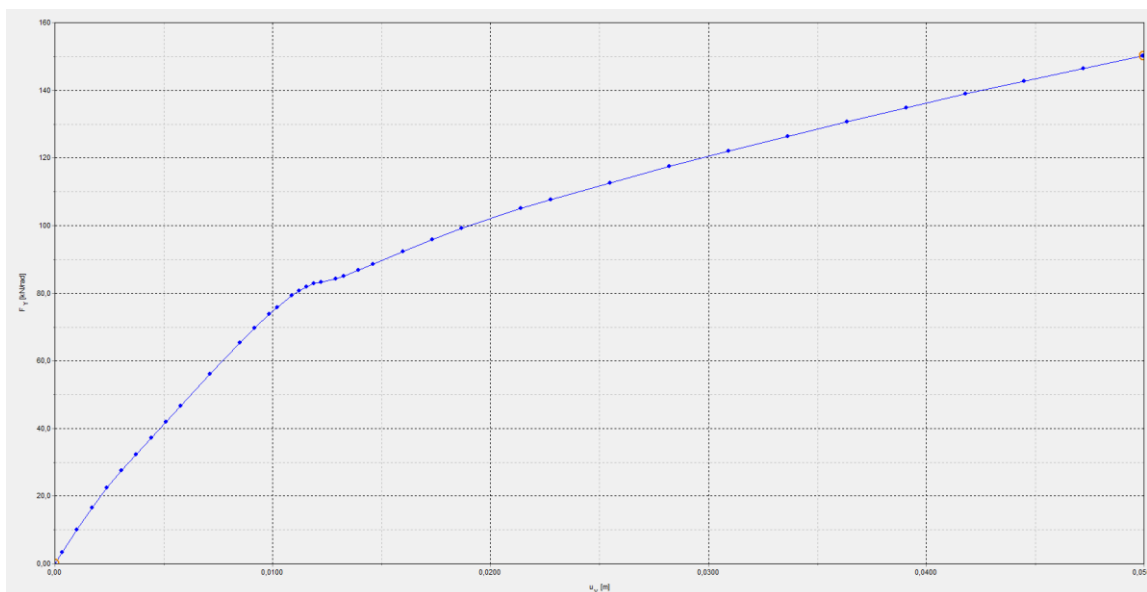


Figure 89 : Allure du graphe en (0 ; 0) pour le cas 2 en Plaxis

L'allure est la même pour une extension et des empreintes plus importantes. La partie élastique a une pente correspondant au couple des modules d'élasticité du sol et du béton. La rupture se produit dans le sol pour une charge correspondant à celle du palier et la seconde partie correspond à la plastification du sol.

3.4.1 Résultats

Pour chaque simulation, les résultats permettent d'afficher les points plastiques. Ce sont à ces points que les matériaux atteignent la phase plastique et se déforment de manière irréversible. C'est aussi dans cette enveloppe que la rupture par cisaillement se produit. En fonction de l'amplitude et de la position de l'anomalie, la forme de la rupture varie. Pour une striction d'amplitude $\xi=0,2$, comme sur la figure ci-dessous, la rupture se produit le long du fût au niveau de l'anomalie. Le sol remplissant la cavité ne rompt pas et se déplace avec le pieu. Un bulbe de rupture est également présent sous la base du pieu.

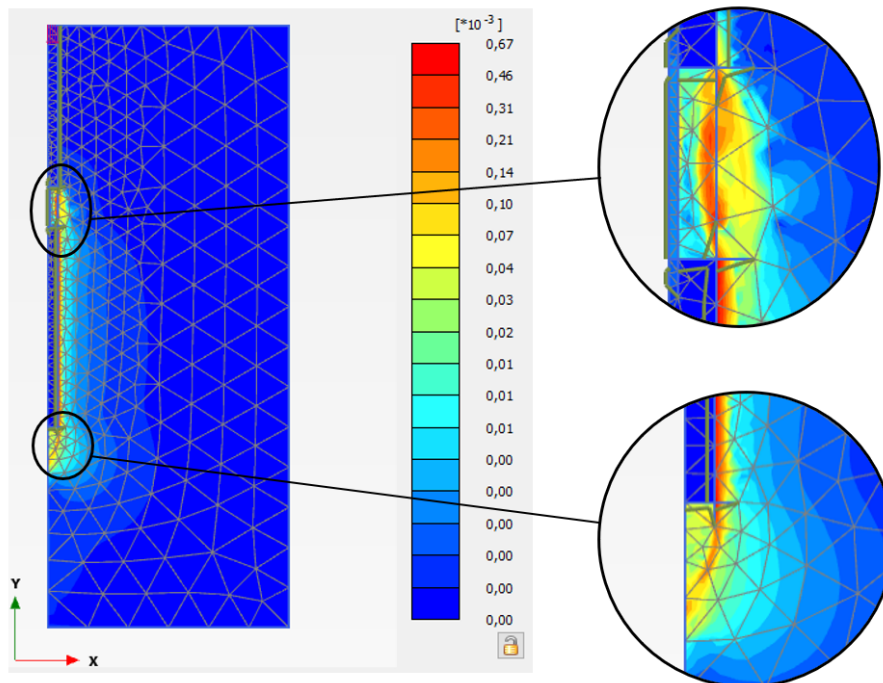


Figure 90 : Striction $\xi=0,2$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 2 Plaxis

Lorsque la taille de l'empreinte de l'anomalie augmente, la rupture ne suivra plus le fût du pieu sain mais elle se produit le long du fût dans l'anomalie. Un bulbe de rupture est également présent sous le pieu.

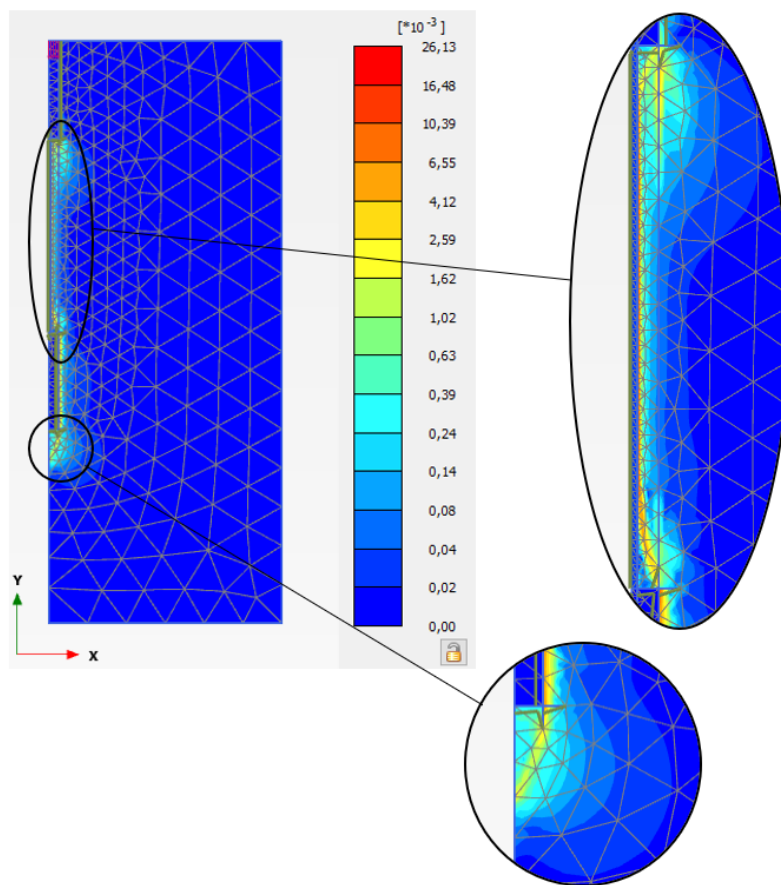


Figure 91 : Striction $\xi=0,2$ en $\zeta=0,25$ et $\lambda=0,5$ pour le cas 2 Plaxis

Pour une extension d'amplitude $\xi=1,4$, le cisaillement est présent tout le long de l'anomalie ainsi qu'à la base comme le montre la figure suivante. C'est également le cas pour une empreinte plus importante.

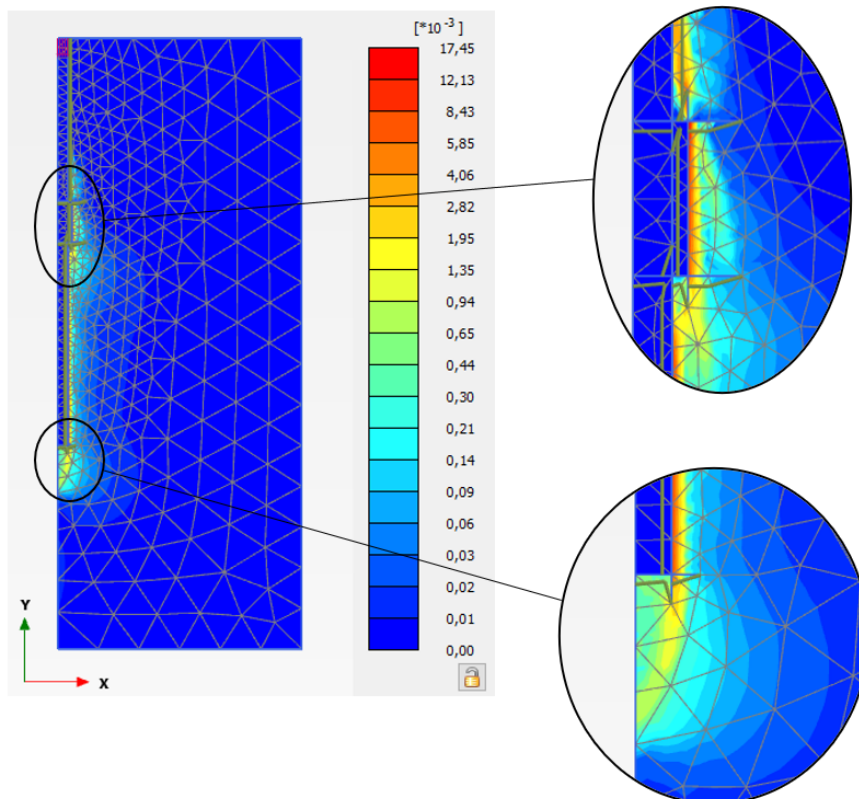


Figure 92 : Extension $\xi = 1,4$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 2 Plaxis

L'évolution du cisaillement et des points plastiques pour toutes les amplitudes et géométries étudiées est schématisée dans l'Annexe D.

3.4.1.1 Variation de la position

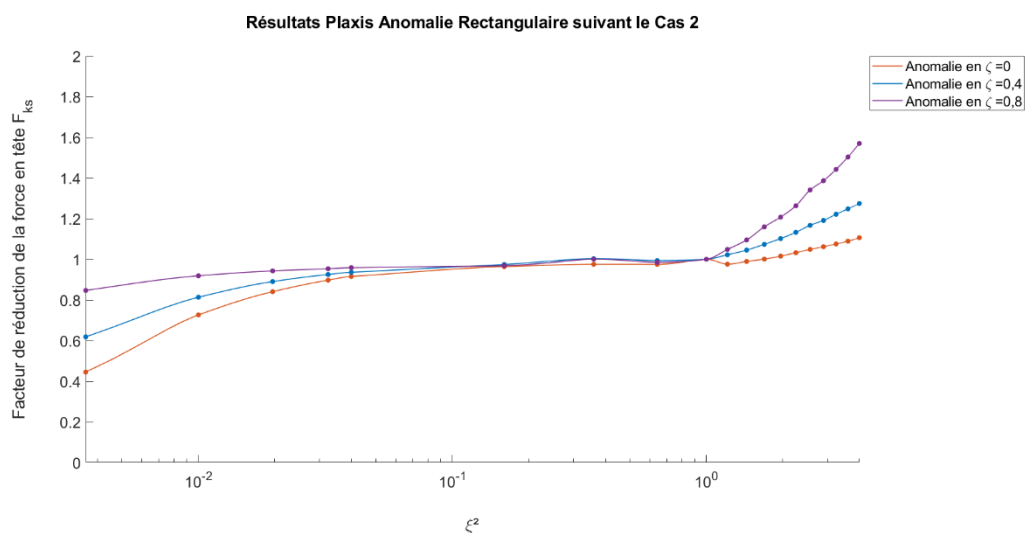


Figure 93 : Variation de la position pour le cas 2 en Plaxis

Comme pour l'approche par ressort et le cas précédent en Plaxis, une striction formée plus en profondeur aura moins d'impact qu'une striction proche de la tête de pieu. Pour une extension, la

force est de nouveau plus grande que pour un pieu sain et elle l'est d'autant plus que l'anomalie est profonde.

A partir de $\xi^2=0,1$ soit une anomalie de rayon compris entre 0,075 m et 0,25 m, le facteur de réduction de la force en tête de pieu est proche de 1. L'anomalie a alors un impact négligeable sur la capacité portante du pieu et ce, quel que soit sa position sur le fût.

3.4.1.2 Variation de l'empreinte

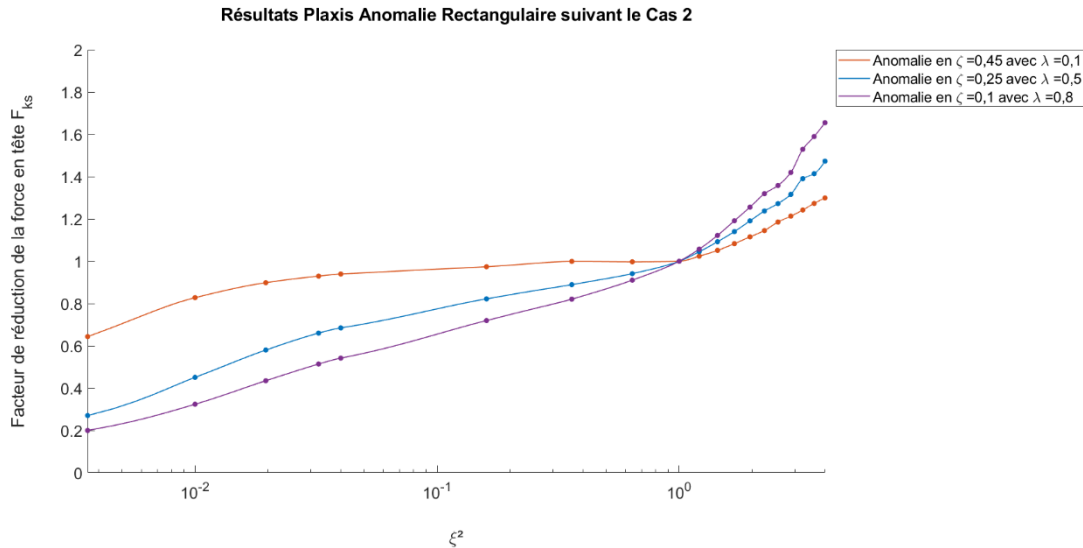


Figure 94 : Variation de l'empreinte pour le cas 2 en Plaxis

Pour une striction, une empreinte plus grande aura, comme pour le cas précédent et l'approche par ressorts, une influence plus négative qu'une anomalie moins haute. A l'inverse, une empreinte plus grande aura une influence positive lorsque l'anomalie est une extension.

3.4.2 Type de pieu

Dans le cas précédent, Plaxis utilise le pieu en flottant. Dans cette section, la même méthode est utilisée afin de connaître la proportion de charge reprise à la base et au frottement.

La charge totale $Q_{base} + Q_{frottement}$ est de 1222,25 kN tandis que la charge reprise à la base est de 219,32 kN. Le pourcentage est donc de 17,94%. Le sol à la base du pieu va donc reprendre plus de charge lorsqu'il suit une loi de Mohr-Coulomb. Le pieu est cependant toujours considéré comme flottant car 82,06% de la charge est reprise par frottement.

3.5 Cas 3 : Sol et béton en Mohr-Coulomb

En définissant le béton et le sable en Mohr-Coulomb, le modèle se rapproche encore plus du comportement réel du pieu en présence d'une anomalie. Pour ce cas-ci, nous supposons que la rupture survient dans le béton avant la rupture dans le sol. Comme pour les deux cas précédents, les mêmes géométries et amplitudes sont étudiées. Les graphes sont toujours tracés avec le déplacement en (0 ; 0) et la force de réaction en ordonnée.

3.5.1 Problème non-associé

Afin de vérifier que le modèle fonctionne bien avec le sable et béton suivant une loi de Mohr-Coulomb, un premier graphe est tracé pour une anomalie en $\zeta=0,4$ avec $\lambda=0,1$ et une amplitude de $\xi=0,14$. L'allure ci-dessous est obtenue. La rupture a bien lieu dans le béton comme attendu car ce dernier peut atteindre sa plasticité. Pour certaines amplitudes, la rigidité du béton est faible. Elle risque donc d'atteindre la contrainte de rupture du béton.

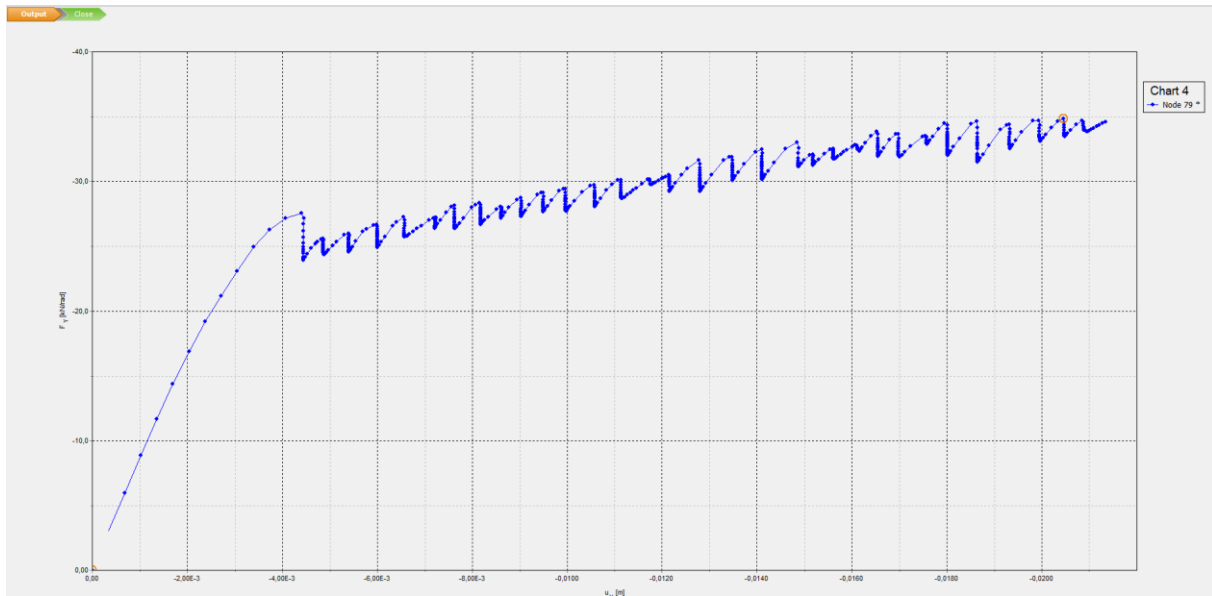


Figure 95 : Oscillations du graphe avec le problème non-associé pour le cas 3

Les oscillations observées sur le graphe ont retenu notre attention car elles n'étaient pas présentes dans les deux cas précédents. En essayant de comprendre d'où elles viennent, plusieurs hypothèses ont été émises. Ce bruit peut provenir :

- Du frottement entre le béton et le sol au niveau de l'interface ;
- D'une instabilité dans les éléments finis.

La première hypothèse a été étudiée en réalisant un modèle où seule la partie de l'anomalie est modélisée. La rigidité des interfaces a ensuite été modifiée en 0, 2/3 et 1 afin d'observer si des oscillations apparaissent lorsque l'interface passe de 1 à 2/3. Les matériaux sont également passés d'une loi de Mohr-Coulomb à une loi élastique linéaire pour observer si le changement de loi provoque des oscillations.

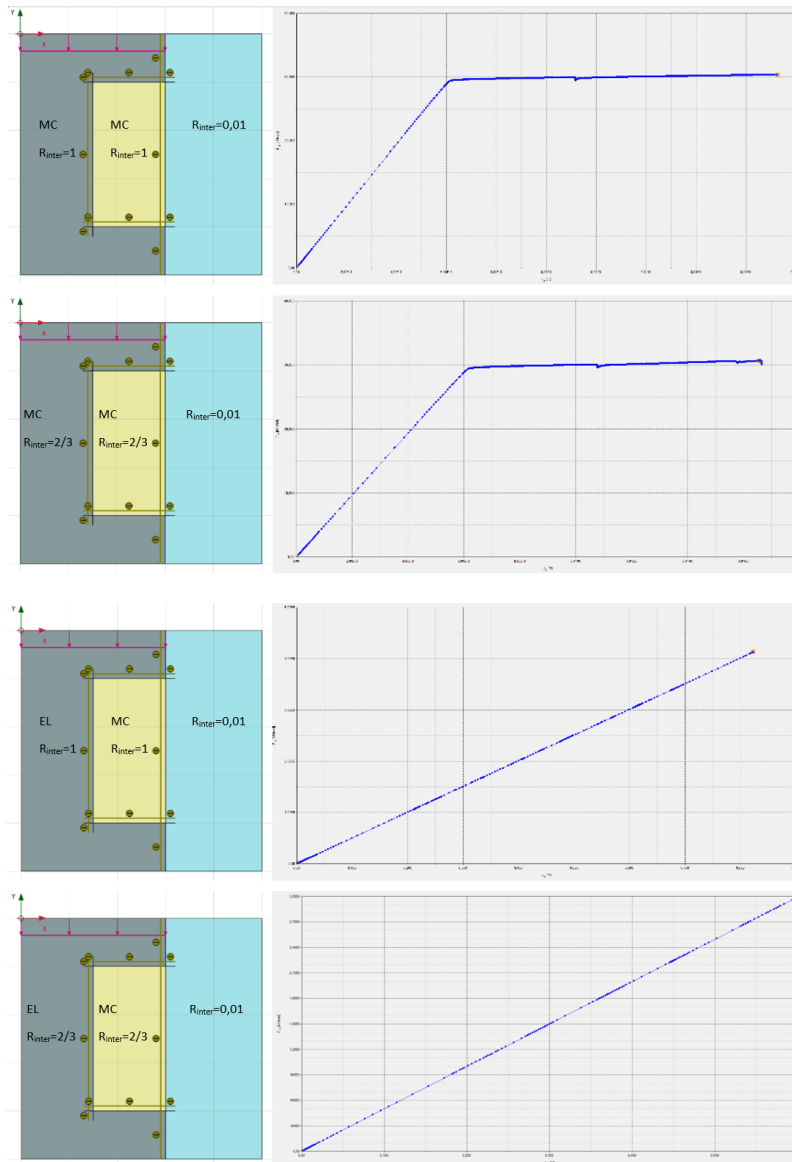


Figure 96 : Hypothèse 1 de l'apparition d'oscillations

Les graphes ne présentant pas d'oscillations, cette hypothèse est rejetée.

Pour la deuxième, le déplacement est remplacé par une force. Le graphe obtenu présente des paliers mais plus d'oscillations. Le problème proviendrait donc du programme et non de nos données.

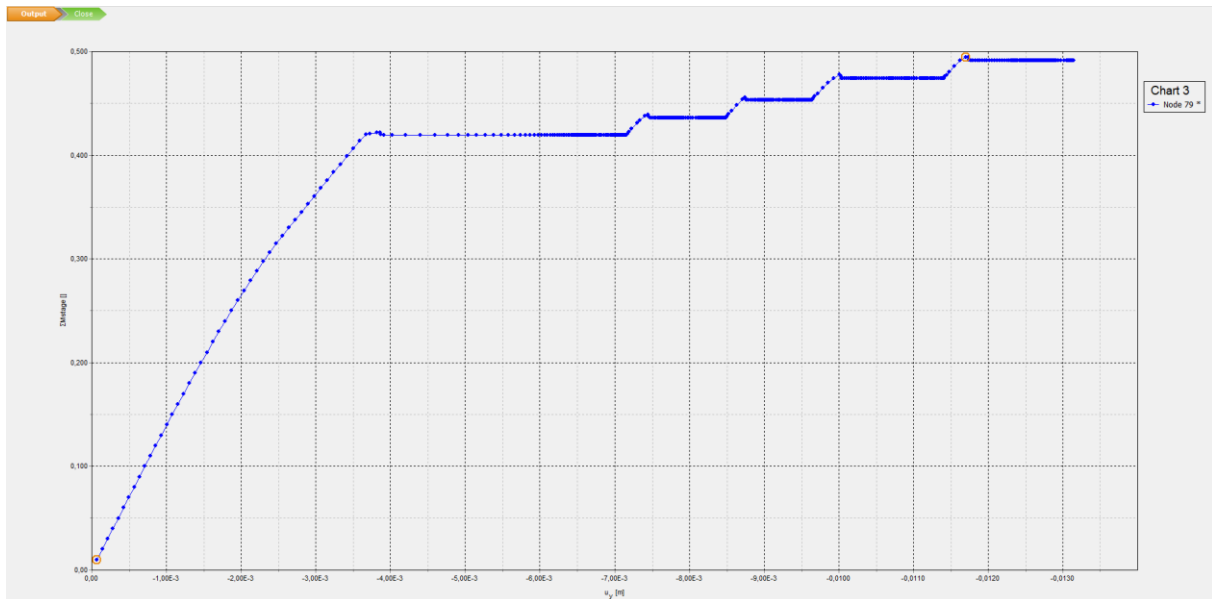


Figure 97 : Graphe lorsque le déplacement imposé devient une force imposée pour le cas 3

Après discussion avec Mustafa Jafari qui réalise sa thèse avec Plaxis à l'UCLouvain, les oscillations sont dues au problème non-associé. Ce problème survient lorsque l'angle de dilatance ψ et l'angle de frottement ϕ ont des valeurs trop éloignées. Pour nos données, $\phi=48^\circ$ et $\psi=0^\circ$, un point matériel du béton ne sait pas vers quelle direction se diriger lorsqu'il est soumis à une force. Sa dilatance étant nulle, son volume ne peut changer et il est obligé de choisir une orientation. Le modèle étant parfait, le logiciel ne sait pas choisir une solution unique et il va donc osciller entre plusieurs. C'est ce basculement entre les solutions qui va créer les oscillations du graphe.

Par analogie, il est possible d'expliquer avec le flambement d'Euler. Lorsqu'une colonne est soumise à une force en tête, le flambement se produit dans une direction préférentielle où une faiblesse y est présente. Lors du calcul du flambement sur papier, la colonne est parfaite et il est impossible de connaître la direction dans laquelle elle va flamber. Le modèle numérique étant parfait, Plaxis ne sait pas où aller.

Pour résoudre cette indétermination, l'angle de dilatance du béton est augmenté en $\psi=\phi-30^\circ=18^\circ$. Le point matériel peut alors se dilater et il ne devra plus choisir une direction. Le graphe obtenu est alors le suivant :

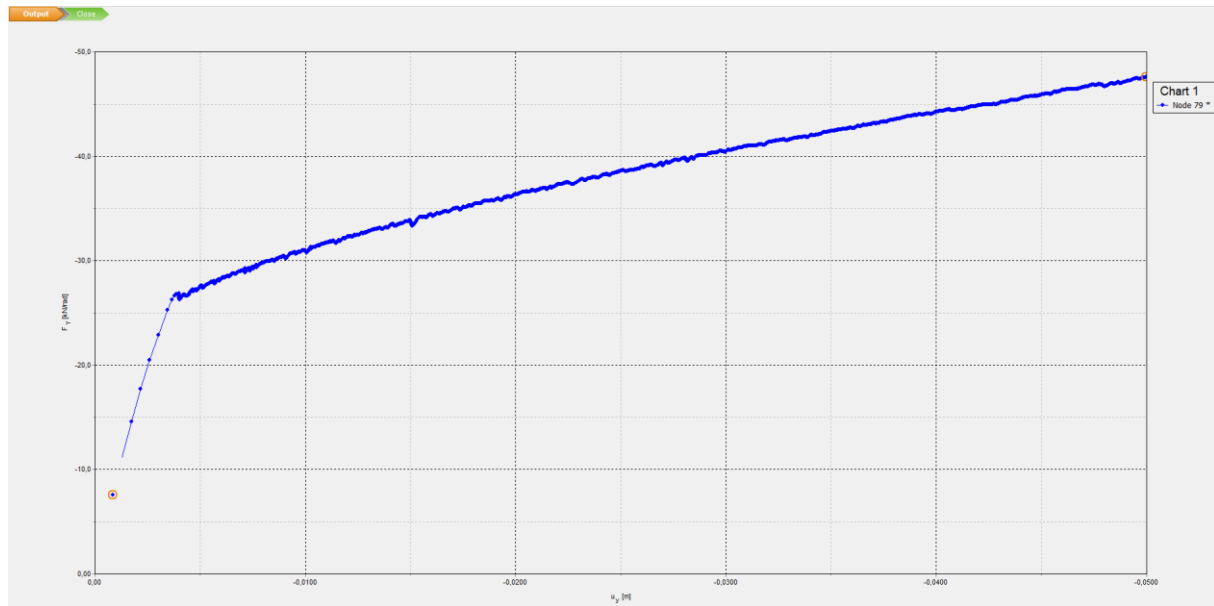


Figure 98 : Graphe en passant à un angle de dilatance de 18° pour le cas 3

Les petites oscillations restantes sont considérées comme acceptables et sont dues à la différence de 30° encore présente entre l'angle de frottement et de dilatance. La tolérance a également été diminuée à 0,005 pour diminuer les oscillations. Avec cette tolérance, le calcul des phases pour certaines géométries n'aboutissait pas. Pour celles-ci, la tolérance a été réaugmentée à 0,01 afin de terminer le calcul et d'atteindre le déplacement imposé de 0,05 m en tête de pieu.

3.5.2 Résultats

Comme pour le cas précédent, l'évolution des points plastiques et des ruptures se trouvent en annexe D sous forme de schémas. Deux types de graphes sont obtenus pour ce cas-ci en Plaxis. Jusqu'en $\xi=0,4$ ou $0,6$, en fonction des géométries, la rupture se produit dans le béton. Ceci est possible car le déplacement appliqué en tête de pieu est assez grand. Mais la présence d'une anomalie crée un changement dans le mécanisme de rupture. En effet lorsque le béton rompt, la charge est transmise au sol adjacent et il en résulte une zone de rupture locale dans le sol. Il est possible de l'observer sur la figure suivante montrant une striction d'amplitude $\xi=0,2$. Un bulbe de cisaillement est également présent en base de pieu.

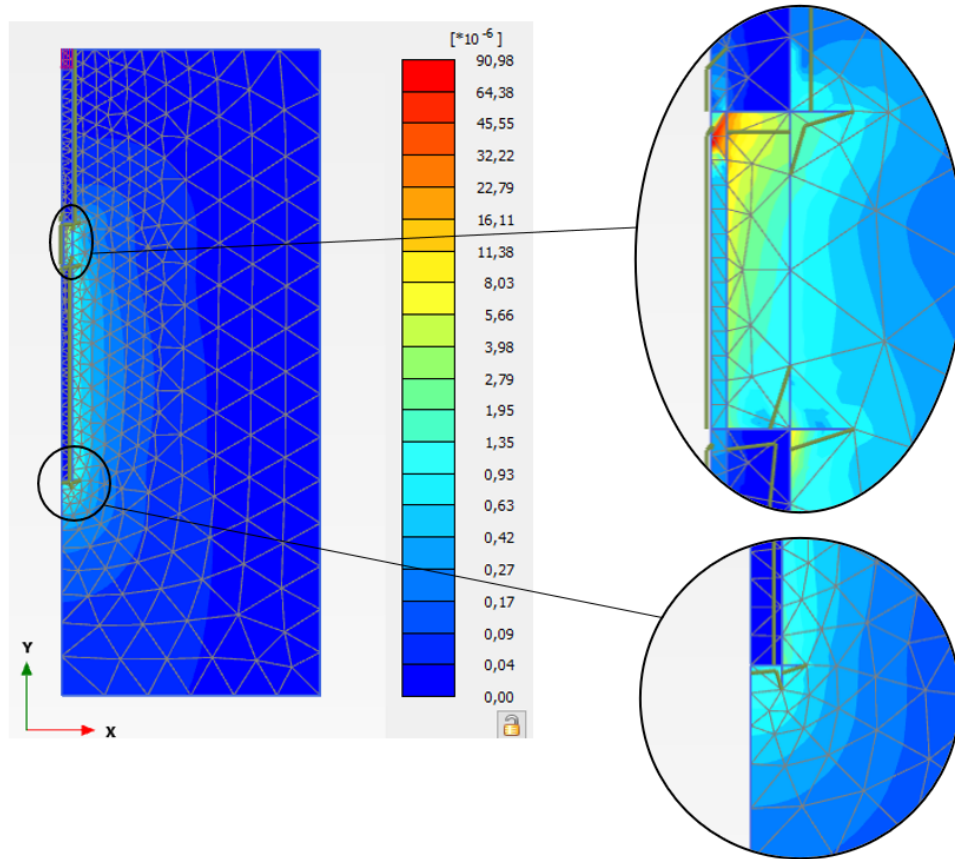


Figure 99 : Striction $\xi=0,2$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 3 Plaxis

Ce type de rupture est également présent lorsque la striction a une empreinte plus importante.

Ce changement de mécanisme de rupture est observable sur le graphe de la force de réaction en fonction du déplacement par un changement de pente dans la partie élastique du graphe. La première pente en gris plus clair correspond à la phase élastique du béton. Une fois que celui-ci rompt, la deuxième pente commence et c'est la phase élastique du sol. Sa rupture est caractérisée par le palier dans le graphe. Sur la figure ci-dessous, le changement de pente se produit en $F_y=22$ kN/rad.

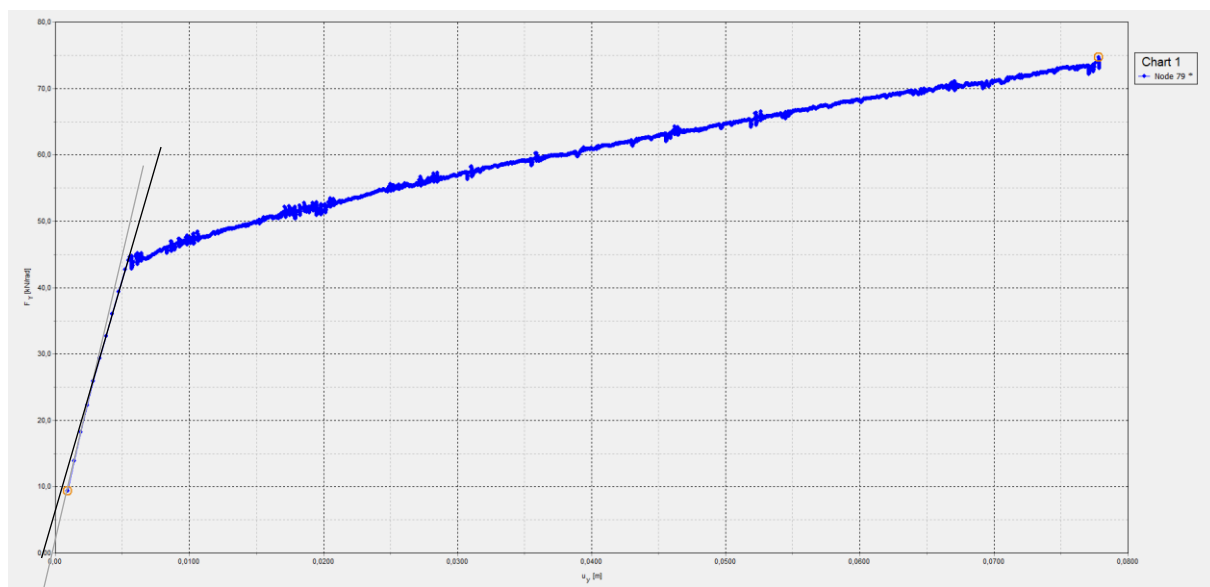


Figure 100 : Allure du graphe pour une anomalie $\xi < 0,6$ en cas 3 Plaxis

A partir de $\xi=0,4$ ou $0,6$, en fonction des géométries, la rupture n'est plus observée dans le béton mais uniquement dans le sol. La rigidité du béton au niveau de l'anomalie devient assez importante pour que la rupture du sol survienne avant celle du béton. Elle devient semblable aux ruptures observées pour le cas 2 de Plaxis. Lorsque l'empreinte devient plus grande, le même mécanisme de rupture apparaît.

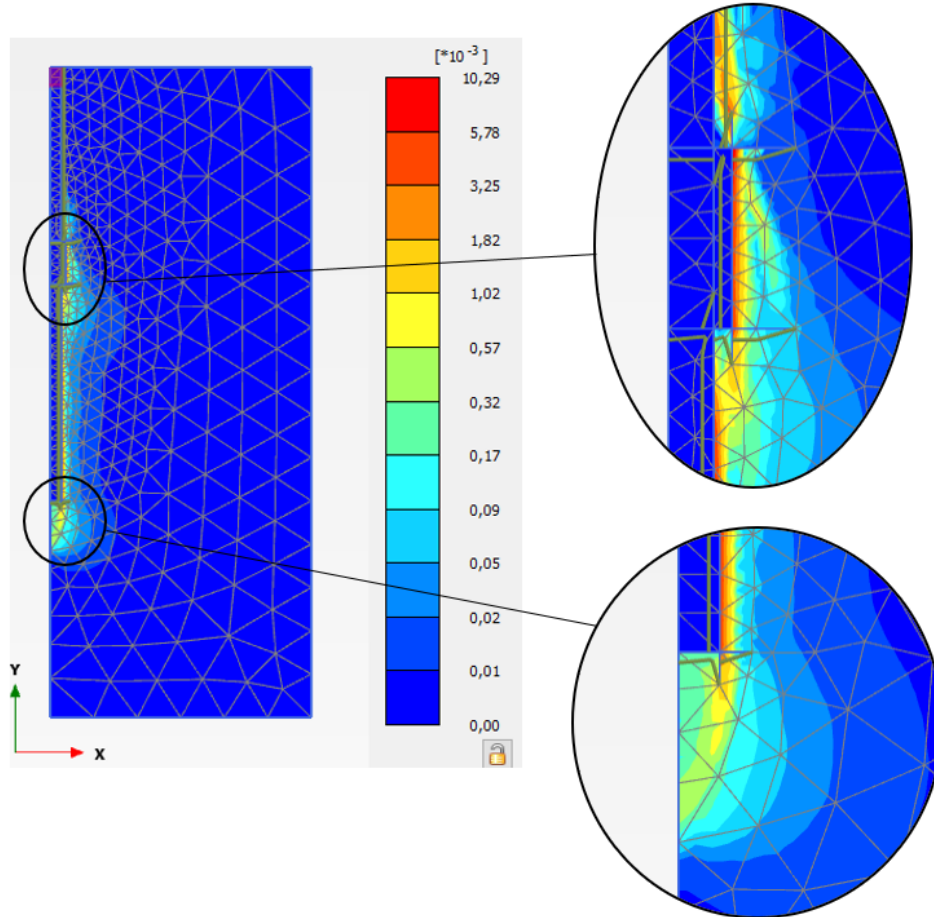


Figure 101 : Extension $\xi=0,2$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 3 Plaxis

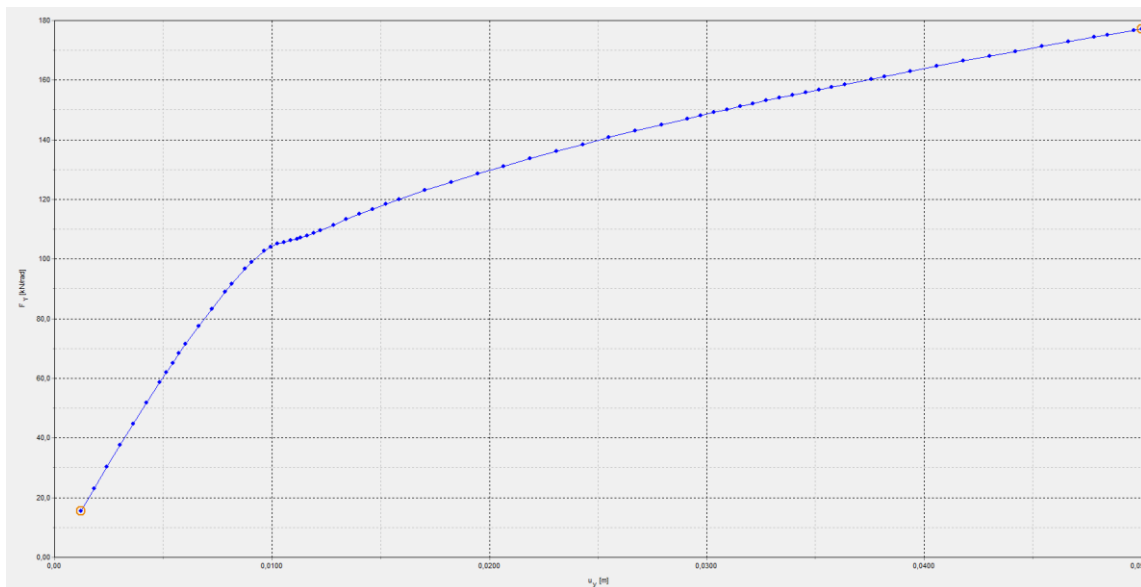


Figure 102 : Allure du graphe pour une anomalie $\xi>0,6$ en cas 3 Plaxis

3.5.2.1 Variation de la position

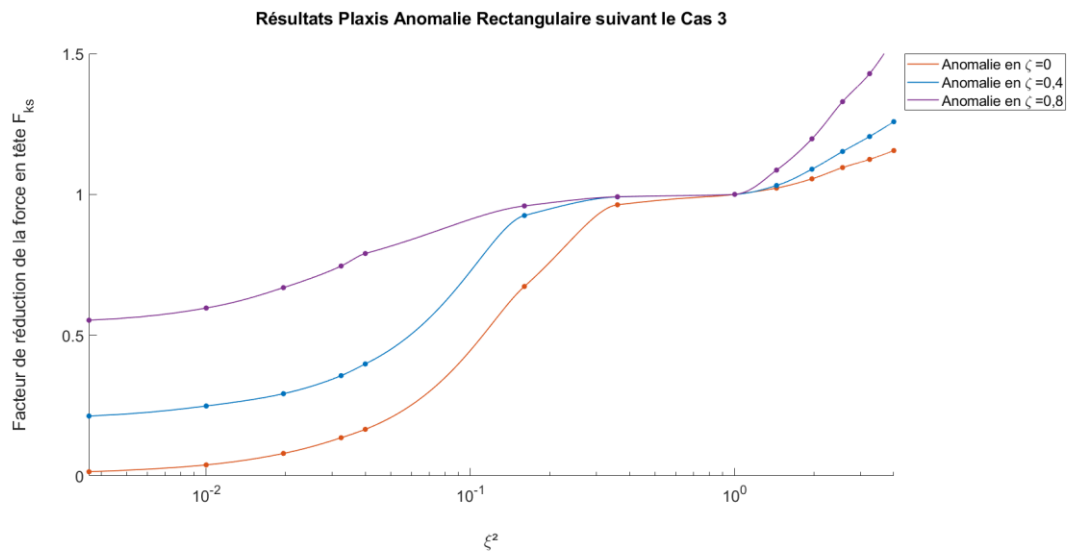


Figure 103 : Variation de la position pour le cas 3 en Plaxis

Comme pour les résultats précédents, plus la réduction de section du pieu se forme profondément, moins la force nécessaire au déplacement imposé sera impacté.

Contrairement au cas précédent, pour des ξ^2 sous 0,36, la force en tête de pieu est fortement réduite. Cela est dû à la rupture survenant dans le béton pour des amplitudes d'anomalie faible. La forte augmentation aux alentours de $\xi^2=10^{-1}$ est le passage de la rupture qui survient d'abord dans le béton à la rupture qui survient que dans le sol.

Une extension du fût à la surface augmentera moins la rigidité en tête de pieu que si elle était plus proche de la base du pieu.

3.5.2.2 Variation de l'empreinte

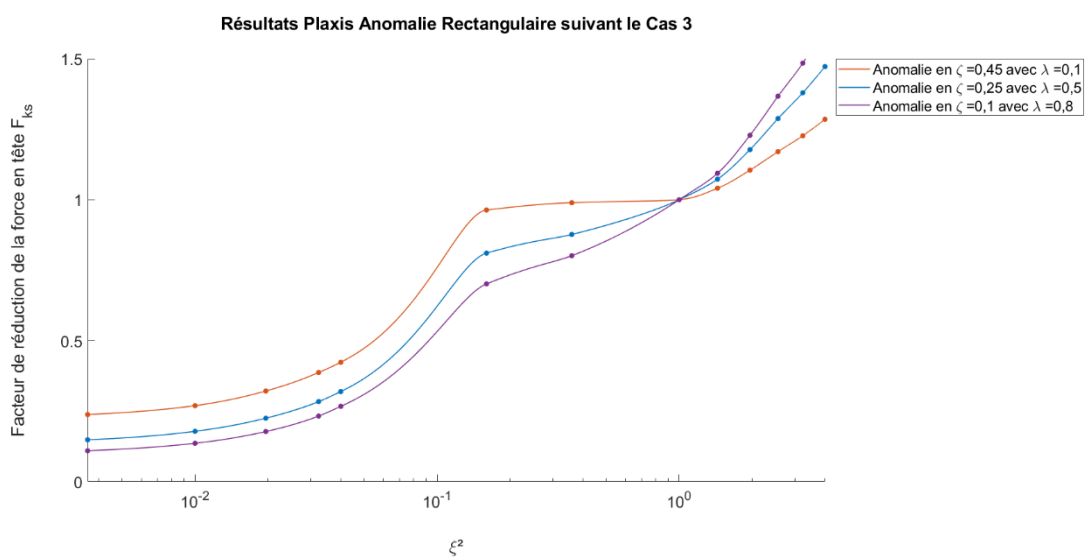


Figure 104 : Variation de l'empreinte pour le cas 3 en Plaxis

Comme précédemment, une anomalie avec une empreinte plus grande sera avantageuse pour une extension et désavantageuse pour une striction.

Le changement brusque autour de $\xi^2=10^{-1}$ est similaire au changement du graphe de la Figure 103 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les mêmes raisons.

Lorsque la rupture survient d'abord dans le béton et non le sol, le facteur de réduction de la force est fortement impacté.

3.5.3 Type de pieu

Dans les cas précédents, Plaxis utilise le pieu en flottant. Dans cette section, la même méthode est utilisée afin de connaître la proportion de charge reprise à la base et au frottement.

La charge totale $Q_{base} + Q_{frottement}$ est de 1221,74 kN tandis que la charge reprise à la base est de 219,9 kN. Le pourcentage est donc de 17,99%, le sol à la base du pieu va donc reprendre plus de charge lorsqu'il suit une loi de Mohr-Coulomb. Le pieu est cependant toujours considéré comme flottant car 82,01% de la charge est reprise par frottement.

Conclusion

Ce mémoire avait pour ambition d'étudier l'impact de la géométrie, de la position et de l'empreinte d'une l'anomalie sur la performance d'un pieu. L'objectif étant de pouvoir tirer des conclusions sur celle-ci en se basant sur les résultats des essais d'intégrité.

Il a fallu dans un premier temps définir une anomalie ainsi que la performance et l'intégrité d'un pieu. Après quelques recherches bibliographiques, nous avons vu que trois types d'anomalies existent et que leurs causes de formation sont multiples. Elles peuvent être localisées à l'aide de nombreux tests d'intégrité moins coûteux que les essais de performance.

Plusieurs acteurs ont commencé une réflexion sur le comportement des pieux défectueux, notamment Poulos (5). Ce dernier analyse les anomalies géométriques et matérielles pour deux positions sur base d'une loi élastique linéaire. Celui-ci n'ayant pas détaillé de manière exhaustive la méthodologie suivie pour arriver à ses résultats, nous avons souhaité retracer son raisonnement. Un modèle composé de ressorts a alors été créé. Leurs rigidités varient en fonction de la présence d'une anomalie ou non. En reprenant les données de Poulos, nous sommes bien retombés sur les mêmes résultats. Nous décidons alors d'aller plus loin dans l'analyse en faisant varier la forme, en incluant un effet de base supplémentaire, et en variant la position et l'empreinte d'une anomalie géométrique.

Nous avons également critiqué l'utilisation d'un facteur d'intégrité structurelle F_{si} utilisé par Poulos. Après analyse, ce facteur mélange les anomalies géométriques et matérielles alors qu'elles ont des mécanismes de rupture différents. De plus, un F_{si} de 1 ne signifie pas forcément un pieu intègre. Nous décidons donc de comparer les amplitudes des anomalies géométriques avec A_d/A et des anomalies matérielles avec E_d/E .

Trois formes sont étudiées, de la plus néfaste, le rectangle, à la moins néfaste, le triangle, en passant par l'ellipse. Pour une extension, la forme de l'anomalie a peu d'impact contrairement à une striction où la rigidité diminue lorsque l'anomalie passe d'une forme triangulaire à elliptique et d'elliptique à rectangulaire.

Puisque nous considérons que la striction dans le béton est remplie par le sol, un effet de base supplémentaire pourrait s'y développer. Celui-ci augmentera la rigidité de la tête de pieu et plus encore lorsque le pieu est de type flottant.

L'anomalie peut se former sur toute la hauteur du pieu. Nous avons donc analysé une anomalie en tête, milieu et proche de la base de pieu. Pour une extension, la position de l'anomalie n'impacte pas la rigidité. Si une base supplémentaire peut se créer sous l'extension, l'apport de rigidité sera plus grand lorsque l'anomalie est proche de la tête de pieu. En revanche pour une striction, plus l'anomalie est proche de la tête de pieu, plus la rigidité est réduite.

L'anomalie peut prendre plus ou moins de place dans le fût. Son empreinte peut donc varier, nous l'avons étudiée de telle façon que le centre de l'anomalie correspond au centre du pieu. Pour une striction, une empreinte plus grande réduira davantage la rigidité du pieu. Mais pour une extension, plus l'empreinte est grande, plus l'apport de béton supplémentaire augmentera la rigidité.

Les conclusions pour la position et l'empreinte d'une anomalie géométrique valent également pour une anomalie matérielle.

Pour s'approcher encore plus du comportement réel d'un pieu défectueux, nous avons réalisé des modèles sur le logiciel Plaxis 2D en utilisant les éléments finis. Trois cas ont été étudiés :

- le béton et sol en élastique linéaire où la rupture ne survient pas ;

- Le béton en élastique linéaire et le sol en Mohr-Coulomb où la rupture survient exclusivement dans le sol ;
- Le béton et sol en Mohr-Coulomb où la rupture survient dans le béton puis dans le sol pour des grosses pertes de section.

La seule forme étudiée est le rectangle et les amplitudes varient de 0 au double du rayon du pieu sain pour chaque géométrie.

Pour le premier cas, les graphes de charge-déplacement sont des droites. Comme pour le modèle à ressorts, plus l'anomalie est proche de la tête de pieu, plus la rigidité diminue. Cette fois-ci, la position a une influence sur la rigidité lorsque l'on a une extension. Nous avons également constaté que plus l'empreinte est importante, plus elle représentera un gain de rigidité pour une extension mais une perte pour une striction. Les résultats de ce cas sont proches de ceux obtenus avec le modèle à ressorts pour un pieu flottant. L'effet de la base supplémentaire n'est cependant présent que pour une extension et son impact n'est pas aussi élevé que celle supposée dans l'approche par ressorts.

Pour le cas suivant, les graphes de charge-déplacement présentent une phase élastique avec une seule pente et une phase plastique. Pour la position, une anomalie proche de la tête de pieu diminuera davantage la rigidité mais cela devient critique lorsque le pieu perd 80% de son diamètre. Si l'anomalie est une extension, la rigidité augmente plus lorsque l'anomalie est en profondeur. Pour l'empreinte, plus celle-ci est importante, plus elle diminuera la rigidité dans le cas d'une striction et elle augmentera la rigidité pour une extension.

Pour le dernier cas analysé avec le sol et le béton suivant une loi de Mohr-Coulomb, les graphes de charge-déplacement présentent une phase élastique avec un changement de pente et une phase plastique. Lorsque le pieu perd plus de 40% de son diamètre, la position et la perte de section provoquent une perte de rigidité. Cette perte est d'autant plus importante lorsque la rupture survient dans le béton. Elle survient quand le pieu perd plus de 40% de son diamètre. Une anomalie proche de la surface sera plus désavantageuse pour la rigidité. Plus l'empreinte est importante, plus la rigidité diminue. Une grosse diminution apparaît si la rupture se produit dans le béton.

Le modèle à ressorts et le cas Plaxis où le sol et béton sont modélisés de manière élastique linéaire fournissent des résultats similaires. Il convient alors de se demander si en modifiant le comportement des ressorts et en incluant un comportement élastique parfaitement plastique, les résultats obtenus seraient similaires à ceux obtenus dans les cas Plaxis où la loi de Mohr-Coulomb intervient.

Bibliographie

1. **Ansriou, Mohamed et Wulleman, Thomas.** Inference in the detection of pile integrity defects using current quality control methods.
2. **Chaussées, Laboratoire Central des Ponts et.** Contrôle de l'intégrité des éléments de fondations profondes de structure de génie civil et de bâtiments. Pieux forés, nerettes et parois moulées - Méthodes d'auscultation. *Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux de l'Aménagement et des Transport.* [En ligne] Avril 2006. [Citation : 28 Janvier 2020.] https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/GuideTechnique/GuideTechnique-LCPC-INTELAUS.pdf.
3. **Hadj Abdelkader, Sanae.** TFE - Etude de l'influence des imperfections géométriques des pieux sur la capacité portante. Bruxelles : Haute Ecole Leonard de Vinci, 2018.
4. **Ansriou, Mohamed.** State of progress : Effect of anomalies on the behaviour of piles. Louvain-la-Neuve : s.n., 2019.
5. **Poulos, Harry G.** Pile Behavior - Consequences of Geological and Construction Imperfections. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering.* 2005, Vol. 131, 5.
6. **Poulos, H. G.** Behaviour of pile groups with defective piles. 1997.
7. **Petek, Kathryn, Felice, Conrad W. et Holtz, R. D.** Deep Foundations. *Capacity Analysis of Drilled Shafts with Defects.* Orlando : s.n., 2002.
8. **Wikipédia .** Théorie de Mohr-Coulomb. *Wikipédia.* [En ligne] [Citation : 03 Août 2020.] https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_de_Mohr-Coulomb.
9. **G-Octopus.** Principe des essais de chargement dynamiques. *G-Octopus.* [En ligne] 16 Décembre 2019. [Citation : 28 Janvier 2020.] <https://www.g-octopus.com/fr/insights/principe-essais-chargeement-dynamiques/>.
10. **Caillard, Bruno.** Mise en oeuvre des pieux. *Maconnerie.* [En ligne] 9 Mai 2017. [Citation : 29 Janvier 2020.] <https://maconnerie.bilp.fr/guide-general/ouvrage/fondations/mise-en-oeuvre-pieux>.
11. **Ifsttar.** Auscultation d'un pieu par impédance. *Méthodes d'auscultation de la structure - Auscultation des fondations.* [En ligne] Octobre 2015. [Citation : 29 Janvier 2020.] https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/pdfs/FicheC6-3-Guide_Auscultation_Ouvrage_Art-Cahier_Interactif_ifsttar.pdf.
12. —. Carottage de pieu. *Méthodes d'auscultation de la structure -Auscultation des fondations.* [En ligne] Octobre 2015. [Citation : 29 Janvier 2020.] https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/pdfs/FicheC6-2-Guide_Auscultation_Ouvrage_Art-Cahier_Interactif_ifsttar.pdf.
13. **Cathie Associates.** Essais et contrôles de fondations profondes . *SoScope.* [En ligne] 2017. [Citation : 29 Janvier 2020.] <https://www.solscope.fr/medias/Presentation%20SQUID-G-OCTOPUSCATHIEASSO.pdf>.
14. **Ministère des transports : direction générale des transports intérieurs.** Les pieux forés : recueil de règles de l'art. s.l. : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1978.
15. *Explicit method to predict the load-movement response of a pile.* **Holeyman, Alain.** s.l. : UCL, 2019.

Table des figures

Figure 1 : Anomalie d'un pieu	10
Figure 2 : Méthodes de contrôle de la qualité des pieux	11
Figure 3 : Test d'intégrité sonique (1)	12
Figure 4 : Enregistrement sonique à trous croisés (1).....	12
Figure 5 : Enregistrement sonique à un seul trou (1).....	13
Figure 6 : Test sismique parallèle (2).....	13
Figure 7 : Diffusion de rayons Gamma (1).....	14
Figure 8 : Profil d'intégrité thermique par sonde (1)	14
Figure 9 : Profil d'intégrité thermique par câbles (1).....	14
Figure 10 : Carottage (1).....	15
Figure 11 : Essai de chargement statique (3)	15
Figure 12 : Essai de chargement dynamique (3)	16
Figure 13 : Différents types d'anomalies (1)	16
Figure 14 : Extension et striction (12)	17
Figure 15 : Anomalies matérielles (12).....	18
Figure 16 : Anomalies formées par des activités de construction à proximité (12).....	18
Figure 17 : Anomalies formées par le recépage du pieu (12)	19
Figure 18 : Anomalies formées par une couche de sol compressive (12).....	19
Figure 19 : Anomalies formées par une mauvaise praticabilité du béton (12).....	20
Figure 20 : Anomalies formées par la chute incontrôlée du béton (12)	20
Figure 21 : Anomalies formées par du sol dans le forage (12).....	21
Figure 22 : Anomalies formées par les effets thermiques du béton (12)	21
Figure 23 : Anomalies formées par les infiltrations d'eau (12)	22
Figure 24 : Anomalies formées par les eaux souterraines sous pression (4)	22
Figure 25 : Courbe de charge-déplacement pour différents bétons (5)	23
Figure 26 : Pieu flottant (7)	24
Figure 27 : Pieu portant à la base (7)	24
Figure 28 : Pourcentage de restriction.....	26
Figure 29 : Hauteurs de couches de résistance différentes	26
Figure 30 : Anomalie géométrique.....	28
Figure 31 : Anomalie matérielle	28
Figure 32 : Disposition des ressorts.....	30
Figure 33 : Ressorts en parallèles.....	30
Figure 34: Ressorts en séries	30
Figure 35 : Calcul ressorts équivalents.....	31
Figure 36 : Pieux analysés par Poulos.....	32
Figure 37 : Comparaison avec Poulos pour un Pieu Flottant	33
Figure 38 : Comparaison avec Poulos pour un Pieu Portant.....	33
Figure 39 : Exemple d'anomalie où $F_{si} = 1$	34
Figure 40 : Formes d'anomalie étudiées	35
Figure 41 : Raffinement du ressort à l'anomalie	35
Figure 42 : Anomalie rectangulaire	36
Figure 43 : Anomalie triangulaire.....	37
Figure 44 : Anomalie elliptique	38
Figure 45 : Variation de la forme pour un pieu portant en $\zeta=0.45$ et $\lambda=0.1$	39
Figure 46 : Perte de section des trois formes.....	40

Figure 47 : Variation de la forme pour un pieu flottant en $\zeta=0.45$ et $\lambda=0.1$	40
Figure 48 : Ressort modélisant la base supplémentaire	41
Figure 49 : Ressorts supplémentaires pour une forme triangulaire	42
Figure 50 : Division en forces de friction et base supplémentaire.....	42
Figure 51 : Division d'une anomalie triangulaire en ressorts.....	43
Figure 52 : Ressorts supplémentaires pour une forme elliptique.....	43
Figure 53 : Rajout d'une base supplémentaire pour un pieu portant en $\zeta=0,45$ et $\lambda=0,1$	44
Figure 54 : Rajout d'une base supplémentaire pour un pieu flottant en $\zeta=0,45$ et $\lambda=0,1$	44
Figure 55 : Variation de la position pour un pieu portant en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$	45
Figure 56 : Variation de la position pour un pieu flottant en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$	45
Figure 57 : Variation de la position pour un pieu portant de forme elliptique.....	46
Figure 58 : Variation de la position pour un pieu flottant de forme elliptique.....	46
Figure 59 : Anomalie en $\xi=0$	47
Figure 60 : Empreintes pour une anomalie rectangulaire.....	47
Figure 61 : Variation de l'empreinte pour un pieu portant en $\zeta=0,25$ et $\lambda=0,5$	48
Figure 62 : Variation de l'empreinte pour un pieu flottant en $\zeta=0.25$ et $\lambda=0.5$	48
Figure 63 : Variation de l'empreinte pour un pieu portant de forme elliptique.....	49
Figure 64 : Amplitude de $\xi=0$ pour différentes formes	49
Figure 65 : Variation de l'empreinte pour un pieu flottant de forme elliptique.....	50
Figure 66 : Pieu tapered	50
Figure 67 : Résultats pieu tapered	51
Figure 68 : Cas étudiés avec Plaxis	53
Figure 69 : Propriétés du projet Plaxis	54
Figure 70 : Polygones représentant le pieu et l'anomalie.....	55
Figure 71 : Géométries des interfaces sur Plaxis.....	56
Figure 72 : Maillage global pour une extension	57
Figure 73 : Maillage au niveau de l'anomalie pour une extension et une striction respectivement....	57
Figure 74 : Activation/désactivation dans la construction par étapes.....	58
Figure 75 : Point (0 ; 0) où le déplacement veut être connu	59
Figure 76 : Distribution de la contrainte verticale pour une striction.....	60
Figure 77 : Distribution du déplacement pour une striction.....	60
Figure 78 : Allure du graphe en (0 ; 0) pour le cas 1 en Plaxis	61
Figure 79 : Différence de perception entre une échelle normale et logarithmique	62
Figure 80 : Striction $\xi= 0,2$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 1 Plaxis	62
Figure 81 : Striction $\xi= 0,2$ en $\zeta=0,25$ et $\lambda=0,5$ pour le cas 1 Plaxis	63
Figure 82 : Extension $\xi= 1,4$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 1 Plaxis	64
Figure 83 : Variation de la position pour le cas 1 en Plaxis	64
Figure 84 : Variation de l'empreinte pour le cas 1 en Plaxis	65
Figure 85 : Comparaison de l'approche par ressorts et numérique.....	66
Figure 86 : Stress point en base du pieu	66
Figure 87 : Reprise des charges en friction et à la base pour le cas 1 Plaxis.....	67
Figure 88 : Comparaison de l'approche par ressorts et numérique avec base supplémentaire	68
Figure 89 : Allure du graphe en (0 ; 0) pour le cas 2 en Plaxis	68
Figure 90 : Striction $\xi= 0,2$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 2 Plaxis	69
Figure 91 : Striction $\xi= 0,2$ en $\zeta=0,25$ et $\lambda=0,5$ pour le cas 2 Plaxis	70
Figure 92 : Extension $\xi= 1,4$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 2 Plaxis	71
Figure 93 : Variation de la position pour le cas 2 en Plaxis	71
Figure 94 : Variation de l'empreinte pour le cas 2 en Plaxis	72

Figure 95 : Oscillations du graphe avec le problème non-associé pour le cas 3.....	73
Figure 96 : Hypothèse 1 de l'apparition d'oscillations	74
Figure 97 : Graphe lorsque le déplacement imposé devient une force imposée pour le cas 3.....	75
Figure 98 : Graphe en passant à un angle de dilatance de 18° pour le cas 3.....	76
Figure 99 : Striction $\xi= 0,2$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 3 Plaxis	77
Figure 100 : Allure du graphe pour une anomalie $\xi<0,6$ en cas 3 Plaxis	77
Figure 101 : Extension $\xi= 0,2$ en $\zeta=0,4$ et $\lambda=0,1$ pour le cas 3 Plaxis	78
Figure 102 : Allure du graphe pour une anomalie $\xi>0,6$ en cas 3 Plaxis	78
Figure 103 : Variation de la position pour le cas 3 en Plaxis	79
Figure 104 : Variation de l'empreinte pour le cas 3 en Plaxis	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Variables d'une anomalie géométrique.....	28
Tableau 2 : Variables d'une anomalie matérielle	29
Tableau 3: Données du modèle ressorts.....	32
Tableau 4 : Données des simulations numériques.....	52

Table des symboles

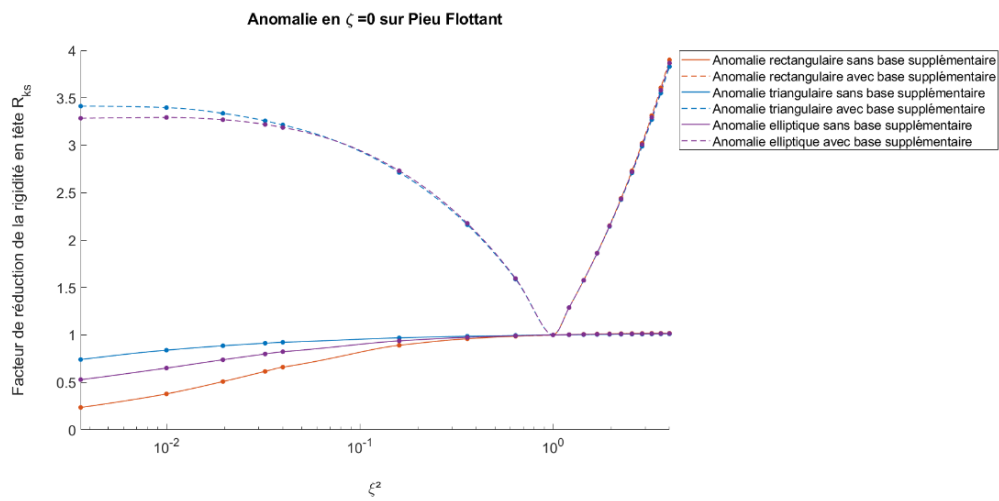
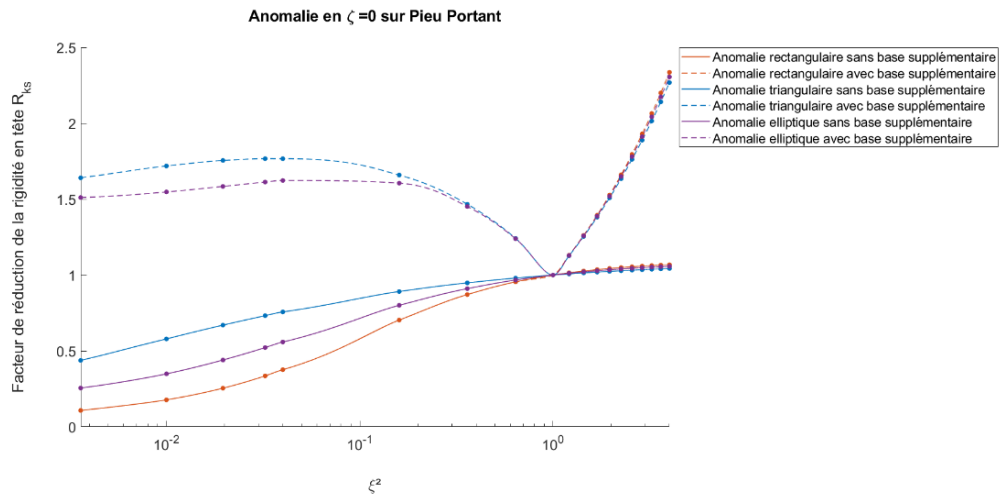
	Symbole	Définition	Unité
Symboles romains	A	Section intacte du pieu	m ²
	A _d	Section minimale du pieu à l'anomalie	m ²
	c'	Cohésion	kPa
	D	Diamètre du pieu	m
	D _{base}	Diamètre de la base du pieu	m
	D _d	Diamètre minimal du pieu à l'anomalie	m
	E	Module d'élasticité du béton	MPa
	E _b	Module d'élasticité du béton	MPa
	E _d	Module d'élasticité du béton défectueux	MPa
	E _s	Module d'élasticité du sol	MPa
	f _b	Contrainte maximale en compression du béton	Pa
	f _d	Contrainte maximale en compression de la couche de béton défectueuse	Pa
	F _{ks}	Facteur de réduction de la force en tête de pieu	/
	f _s	Contrainte maximale en compression du sol	Pa
	F _{si}	Facteur d'intégrité structurelle	/
	F _y	Force de réaction verticale	kN/rad
	K	Rapport des modules d'élasticité du béton et du sol	/
	k _{base}	Rigidité de la base du pieu	kN/m
	k _{pieu}	Rigidité du pieu	kN/m
	k _{sol}	Rigidité du sol	kN/m
	L	Longueur du pieu	m
	L _d	Longueur de l'anomalie	m
	L _{ressort}	Longueur du ressort	m
	P	Charge en tête de pieu	kN
	P _u	Capacité géotechnique ultime du pieu	kN
	Q _{base}	Charge reprise à la base	kN
	Q _{frottement}	Charge reprise au frottement	kN
	R	Rayon du pieu	m
	R _d	Rayon minimal de l'anomalie	m
	R _{inter}	Rigidité de l'interface	/
R _{ks}	Facteur de réduction de la raideur en tête de pieu	/	
u _y	Déplacement imposé vertical	m	
x	Profondeur à partir de z _d	m	
y	Perte de rayon	m	
z _d	Profondeur de l'anomalie	m	
Symboles grecs	α	Angle du tapered pile	°
	γ _{insaturé}	Masse volumique insaturée	kN/m ³
	γ _{saturé}	Masse volumique saturée	kN/m ³
	ΔD	Différence entre les rayons maximal et minimal	m
	ε _b	Déformation du béton	mm
	ζ	Position de l'anomalie	/
	η	Pourcentage d'inclusion de sol dans le béton	%
	θ	Angle formé par une anomalie triangulaire	°
	λ	Empreinte de l'anomalie	/
	ν	Coefficient de Poisson du béton	/
	ν _s	Coefficient de Poisson du sol	/

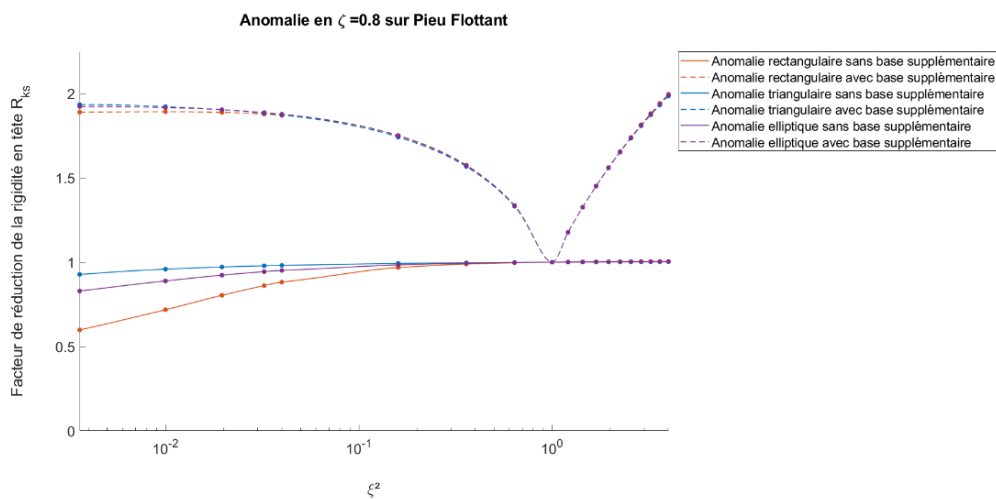
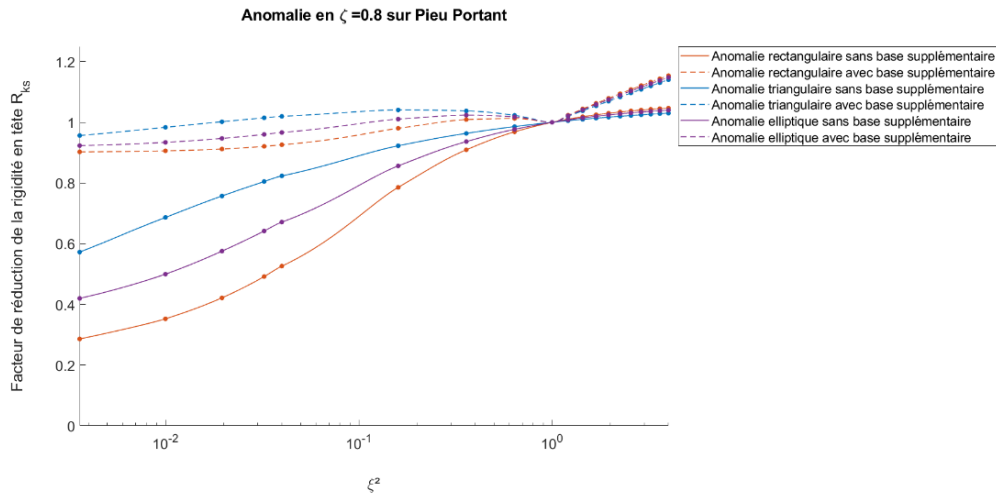
	ξ	Amplitude de l'anomalie	/
	σ_b	Contrainte dans le béton	Pa
	ϕ	Angle de frottement	°
	ψ	Angle de dilatance	°

Annexes

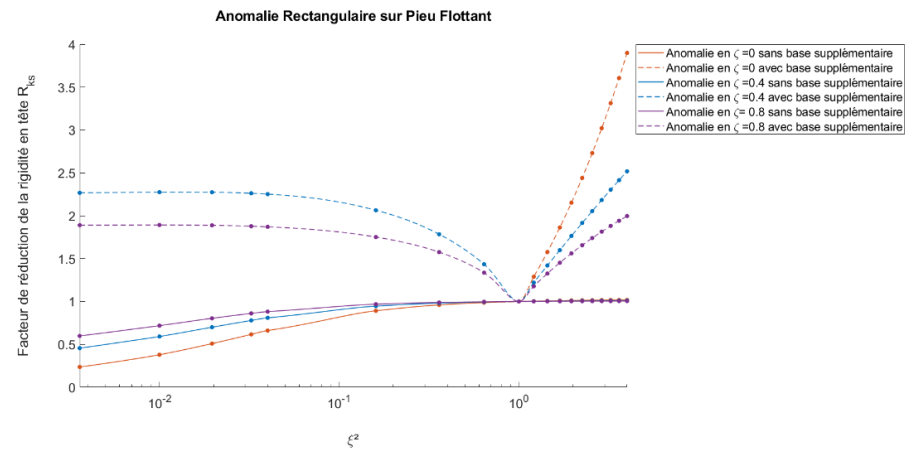
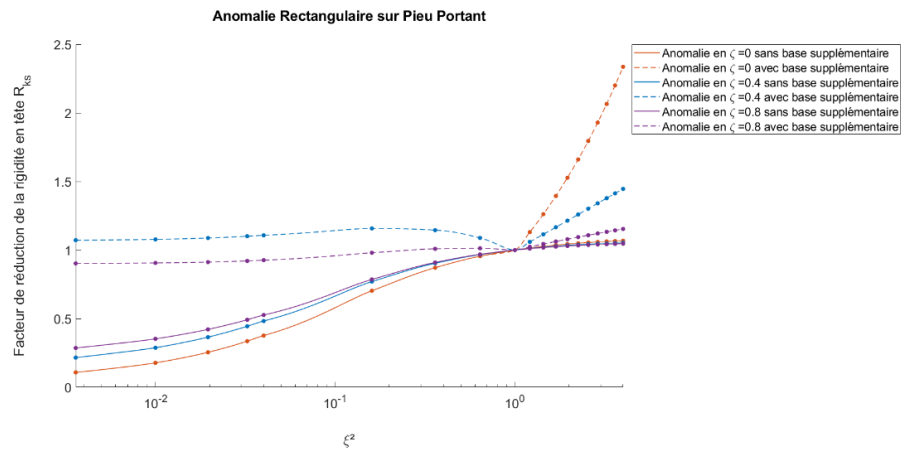
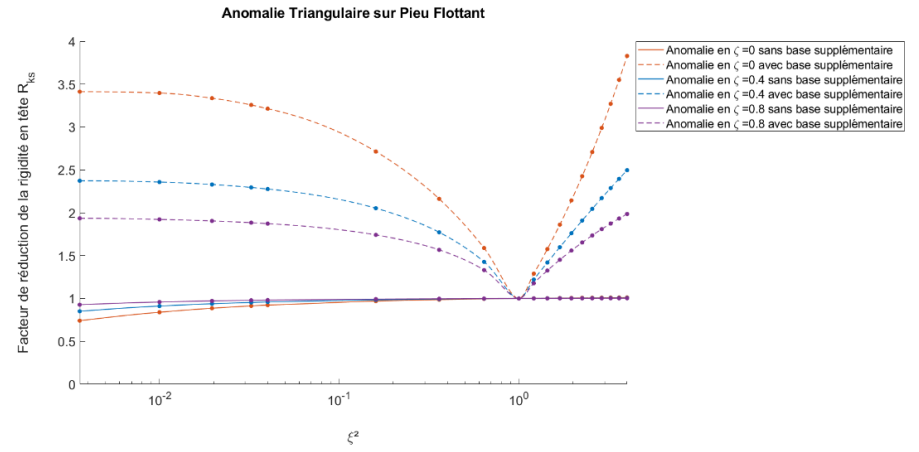
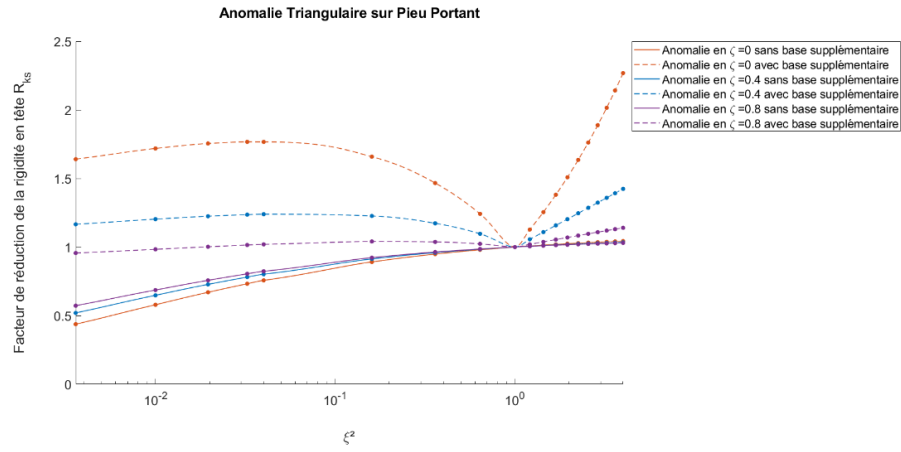
Annexe A

Pour des $\zeta=0$ et 0,8, la forme elliptique est au centre des formes rectangulaires et triangulaires. Les mêmes conclusions sont déduites que pour la position $\zeta=0,4$ c'est-à-dire que la forme de l'anomalie impacte peu lorsqu'il s'agit d'une extension. La base supplémentaire impacte davantage la rigidité en tête de pieu lorsque celui-ci est considéré comme flottant.



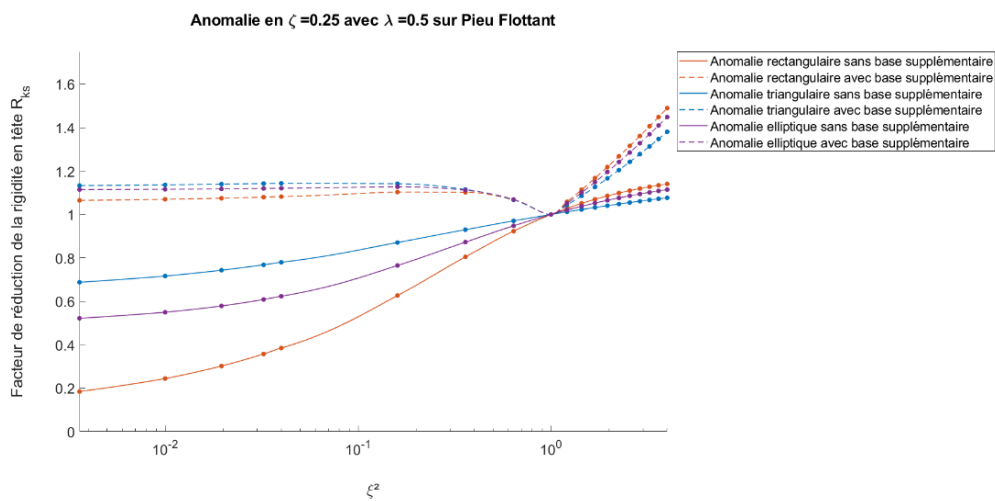
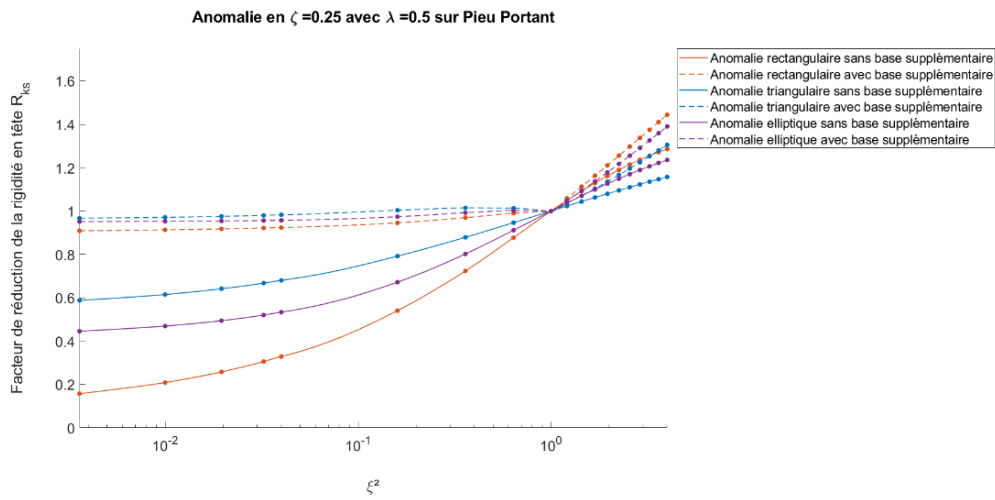


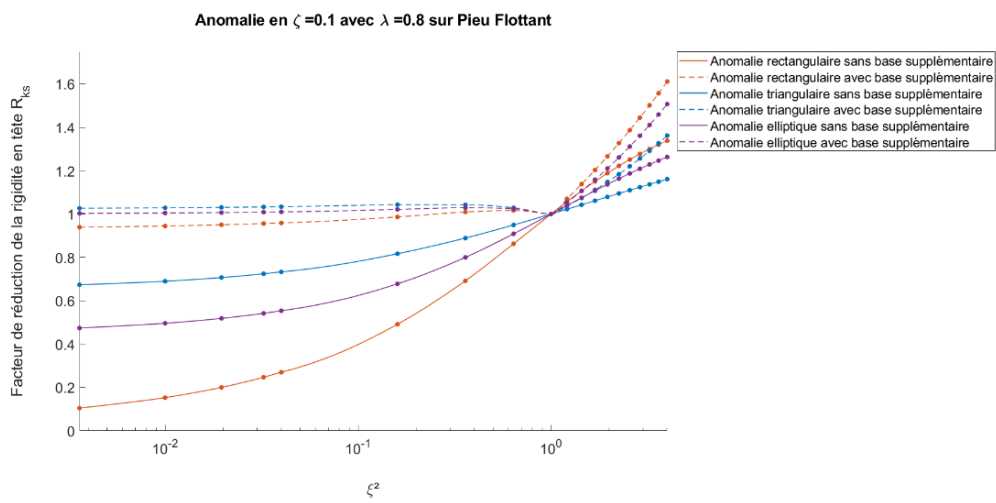
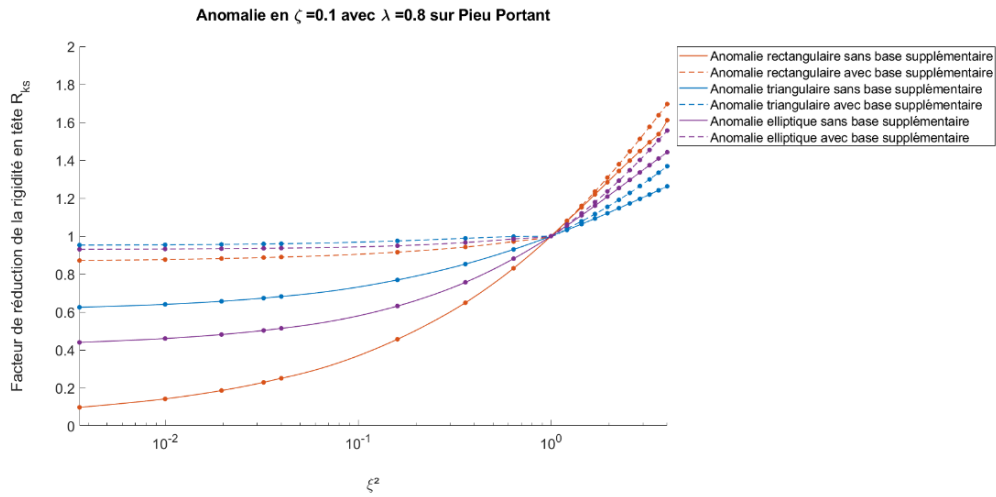
Comme pour une anomalie elliptique, les formes rectangulaires et triangulaires amènent aux mêmes conclusions. Une striction proche de la surface impactera négativement la rigidité de la tête de pieu. Cependant pour une extension, la profondeur n'influence que peu la rigidité. Si une base supplémentaire est considérée, elle avantage la rigidité.



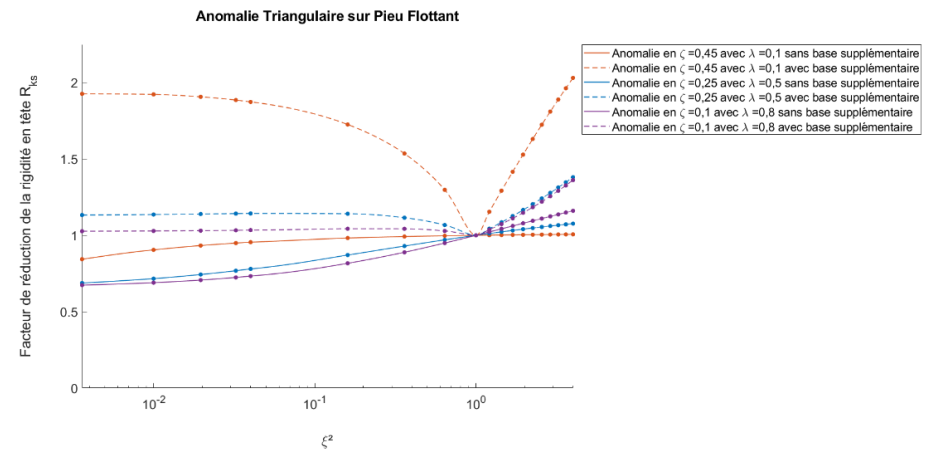
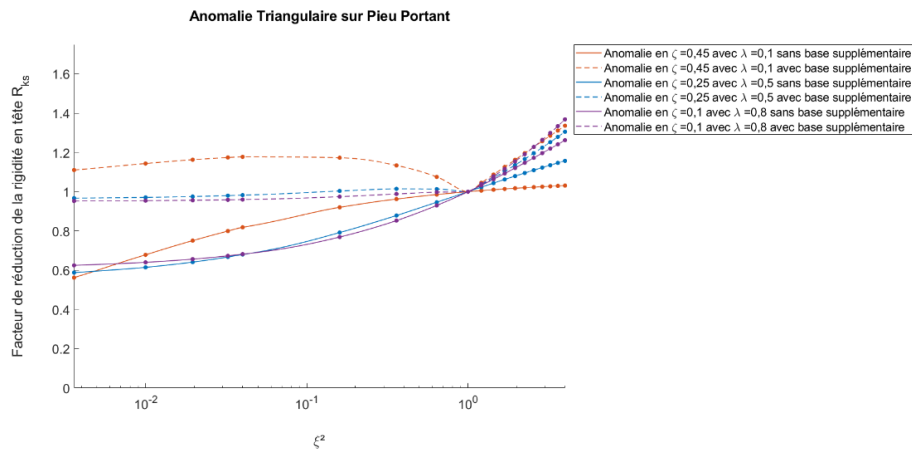
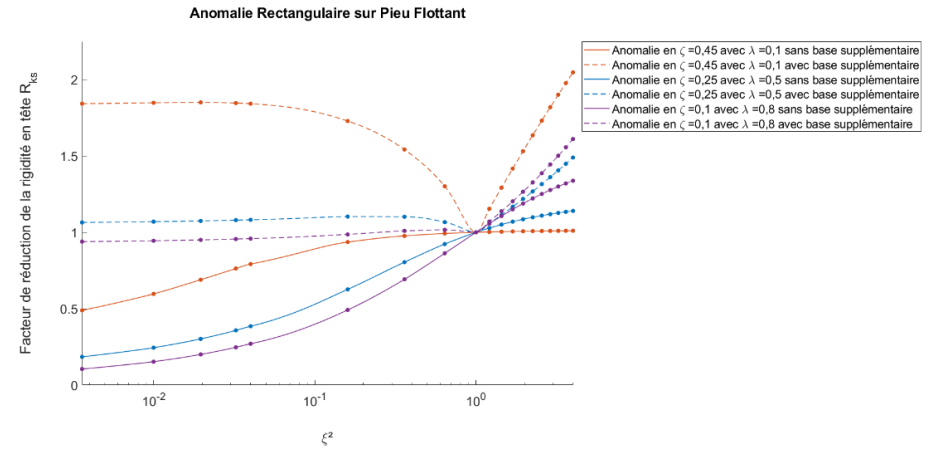
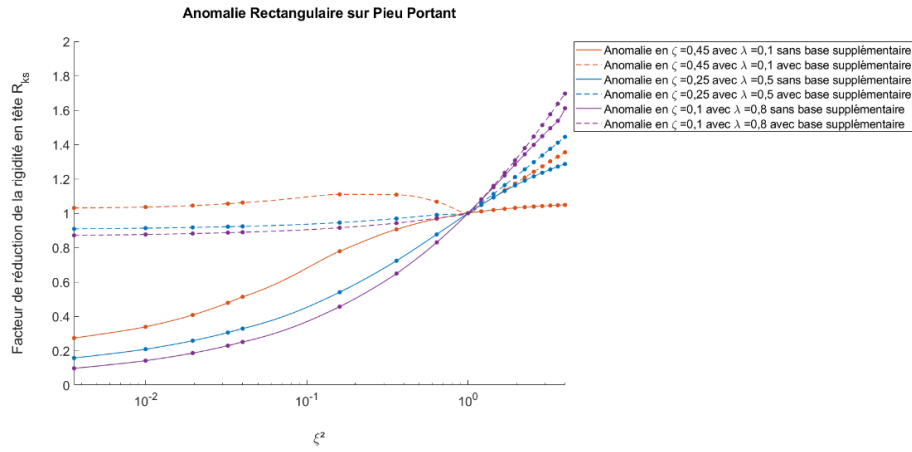
Annexe B

Comme pour une empreinte de $\lambda=0,1$, la forme elliptique se retrouve également entre les formes rectangulaires et triangulaires pour des empreintes de $\lambda=0,5$ et $\lambda=0,8$.



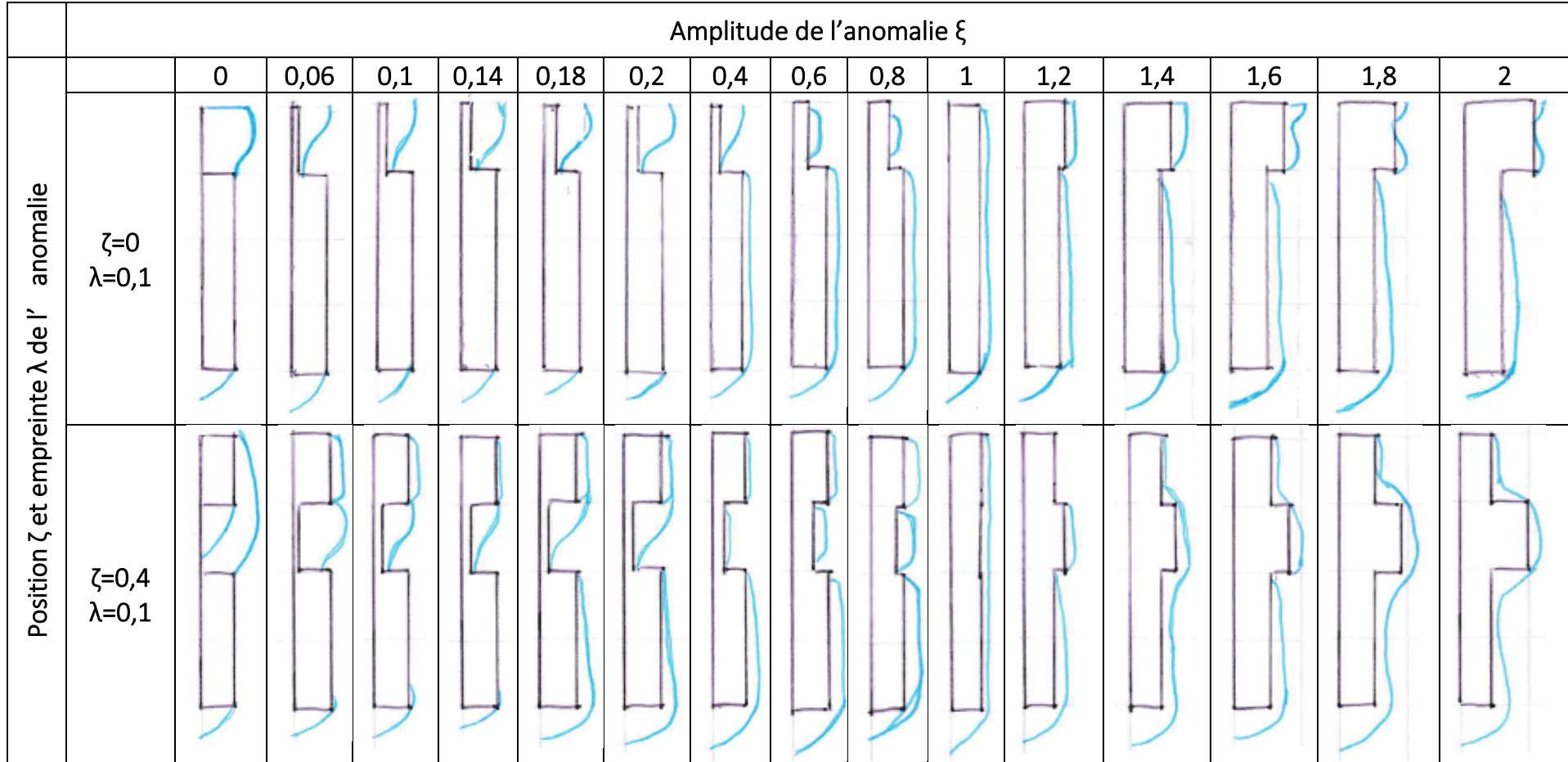


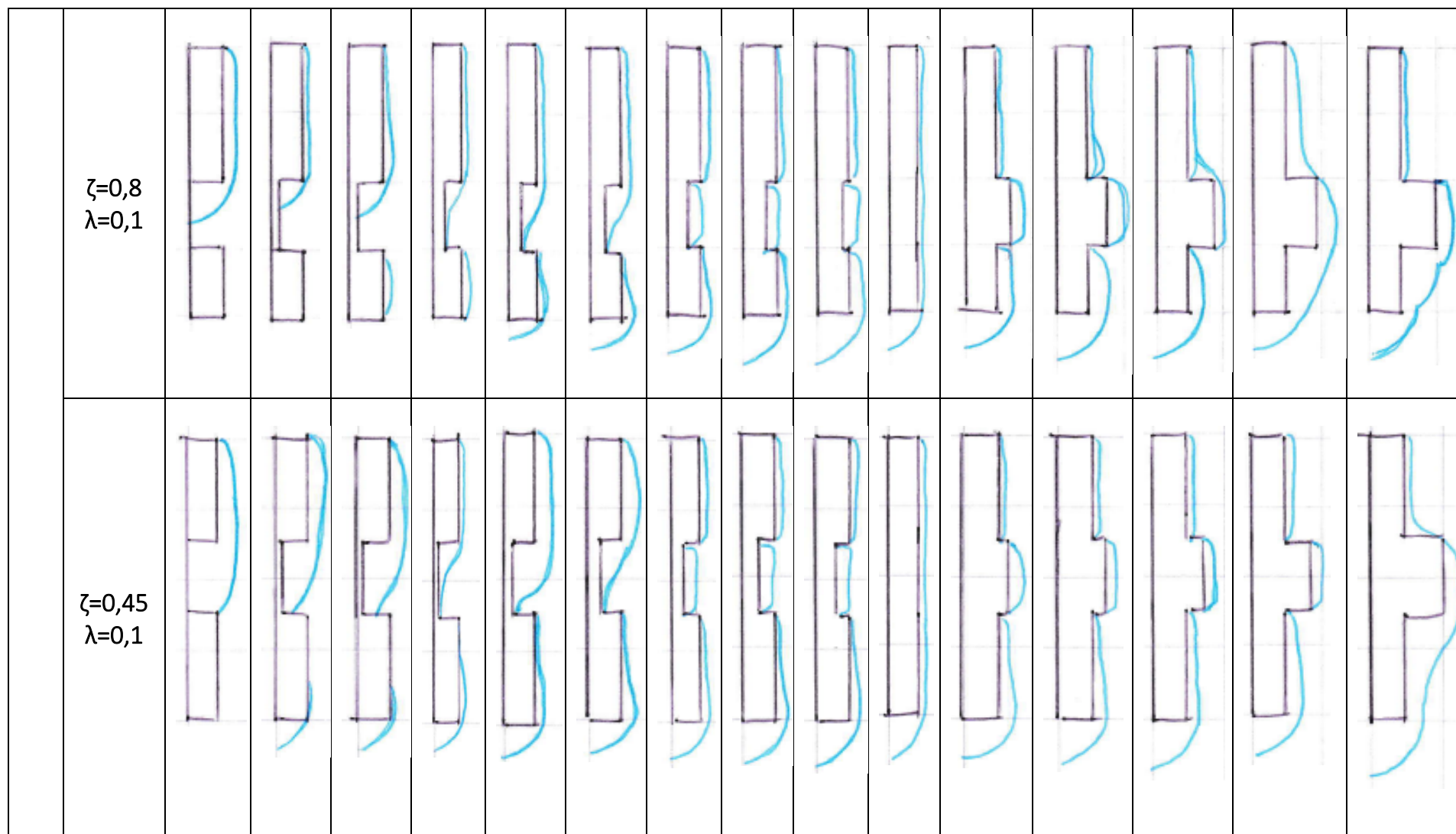
Comme pour une anomalie elliptique, les formes rectangulaires et triangulaires amènent aux mêmes conclusions. Une striction dont l’empreinte est plus élevée diminuera davantage la rigidité en tête de pieu.

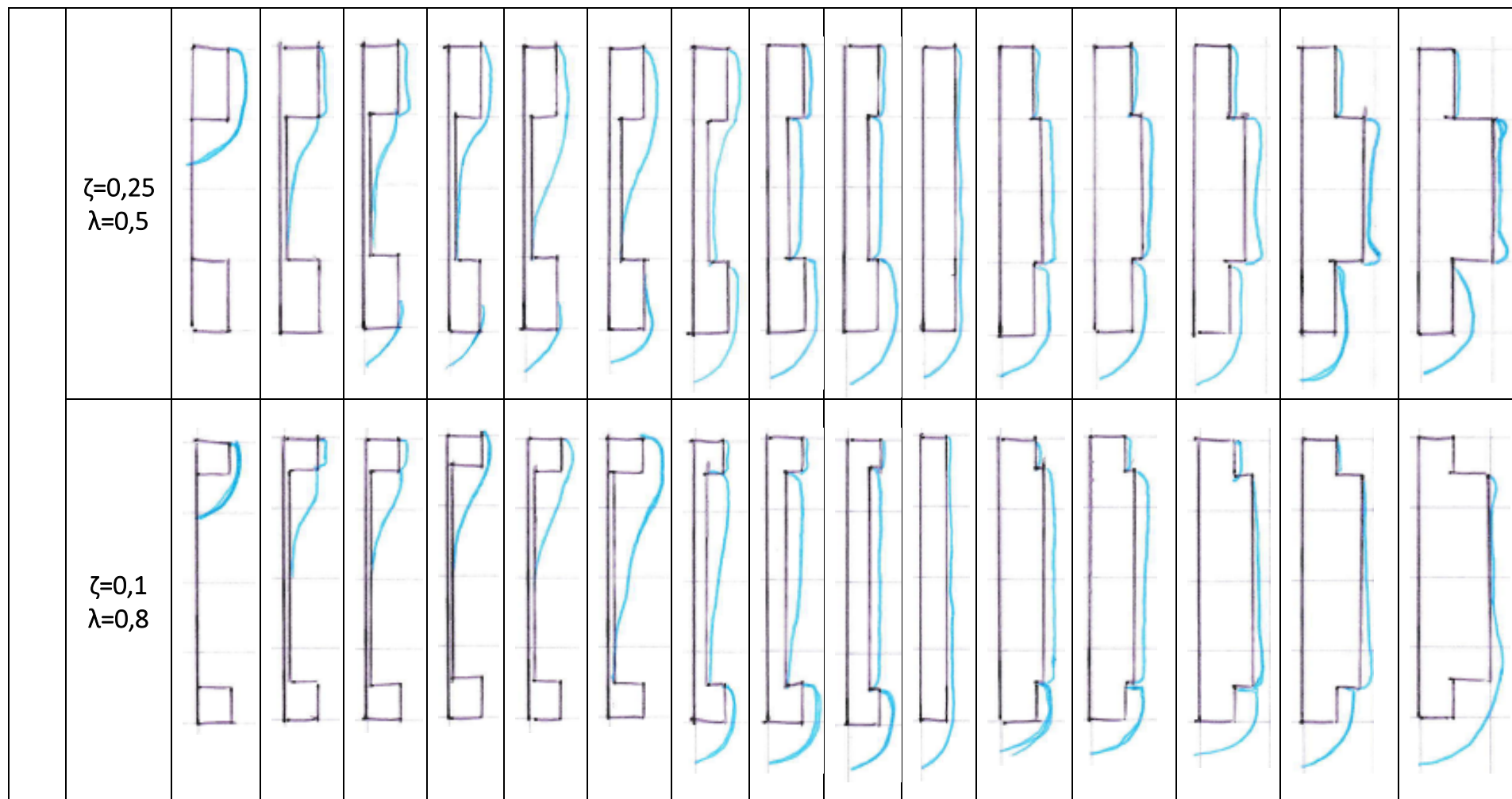


Annexe C

Le tableau ci-dessous montre l'évolution de la rupture par cisaillement en bleu pour les différentes géométries et amplitudes de l'anomalie. Le sol et le béton suivent une loi élastique linéaire.

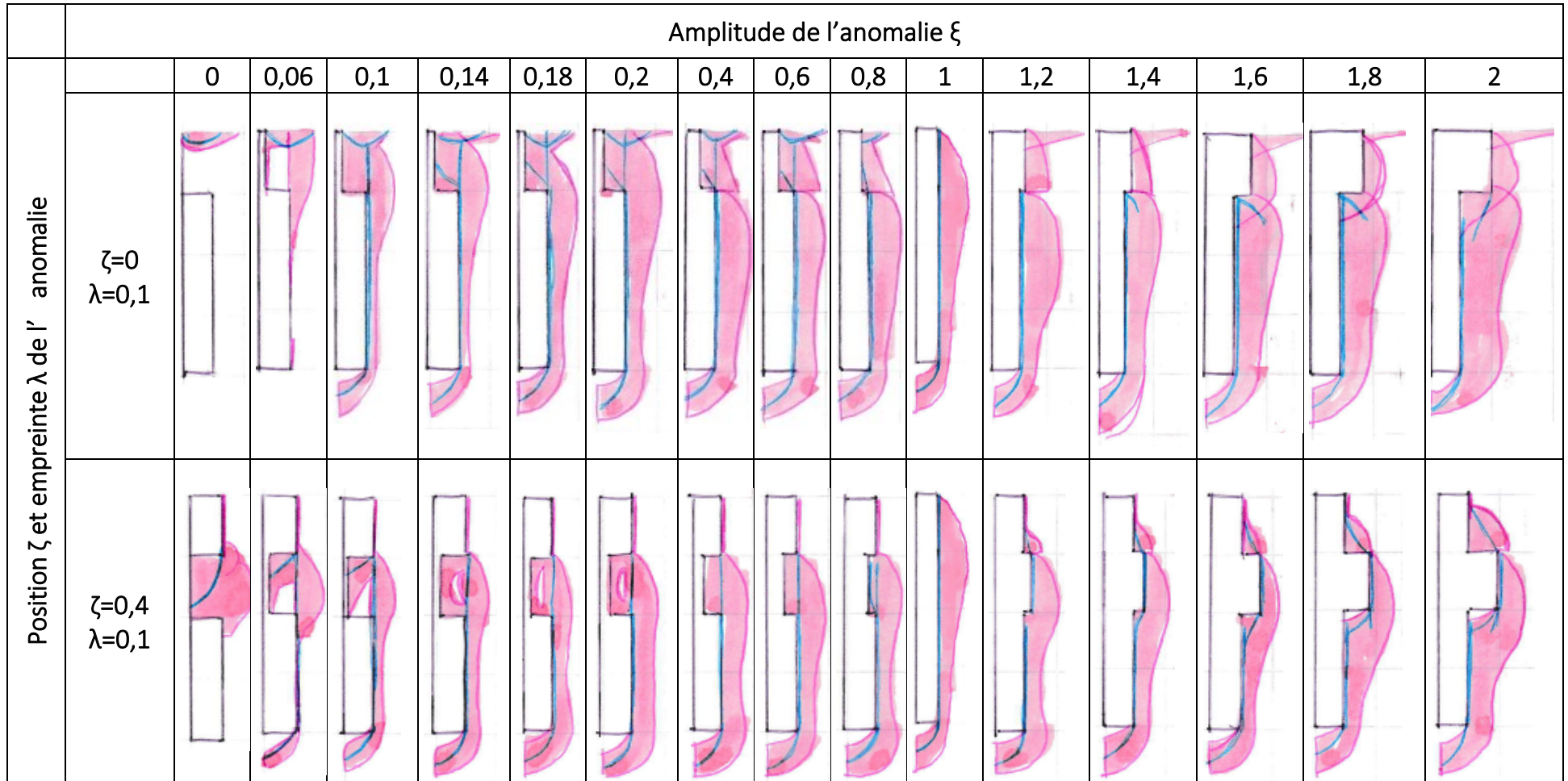


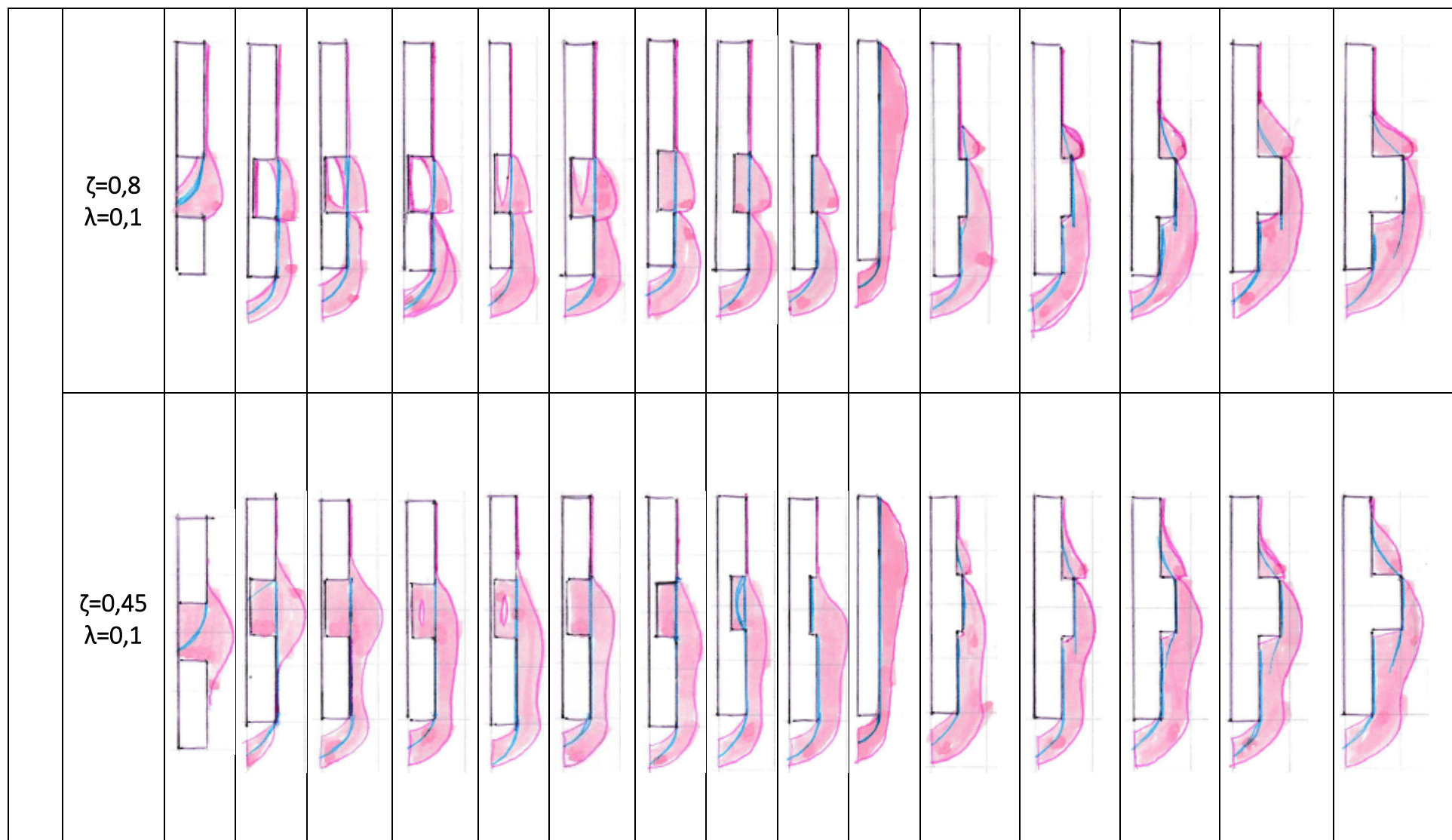


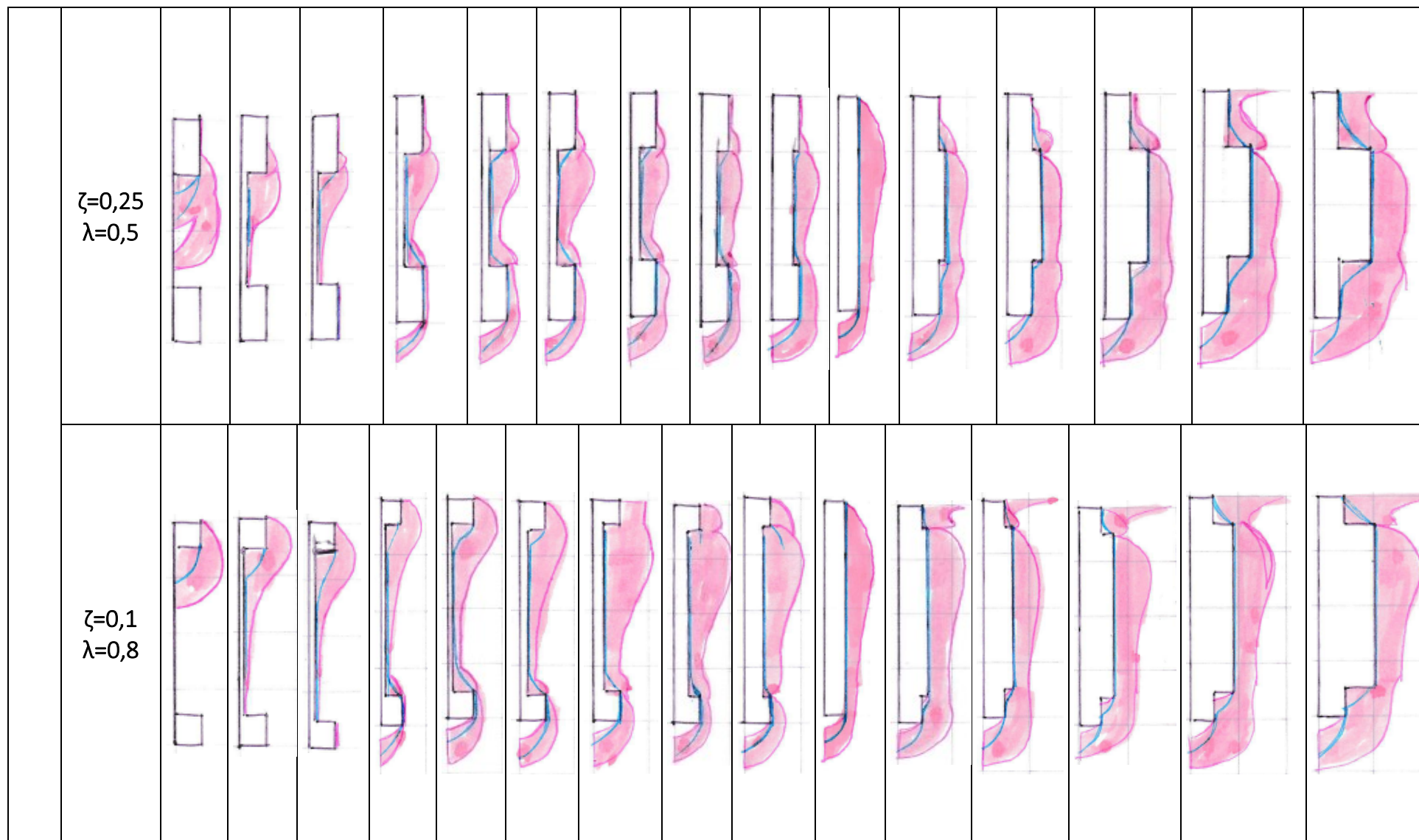


Annexe D

Le tableau ci-dessous montre l'évolution des points plastiques en rose et de la rupture par cisailement en bleu pour les différentes géométries et amplitudes de l'anomalie. Le sol suit une loi de Mohr-Coulomb et le béton une loi élastique linéaire.

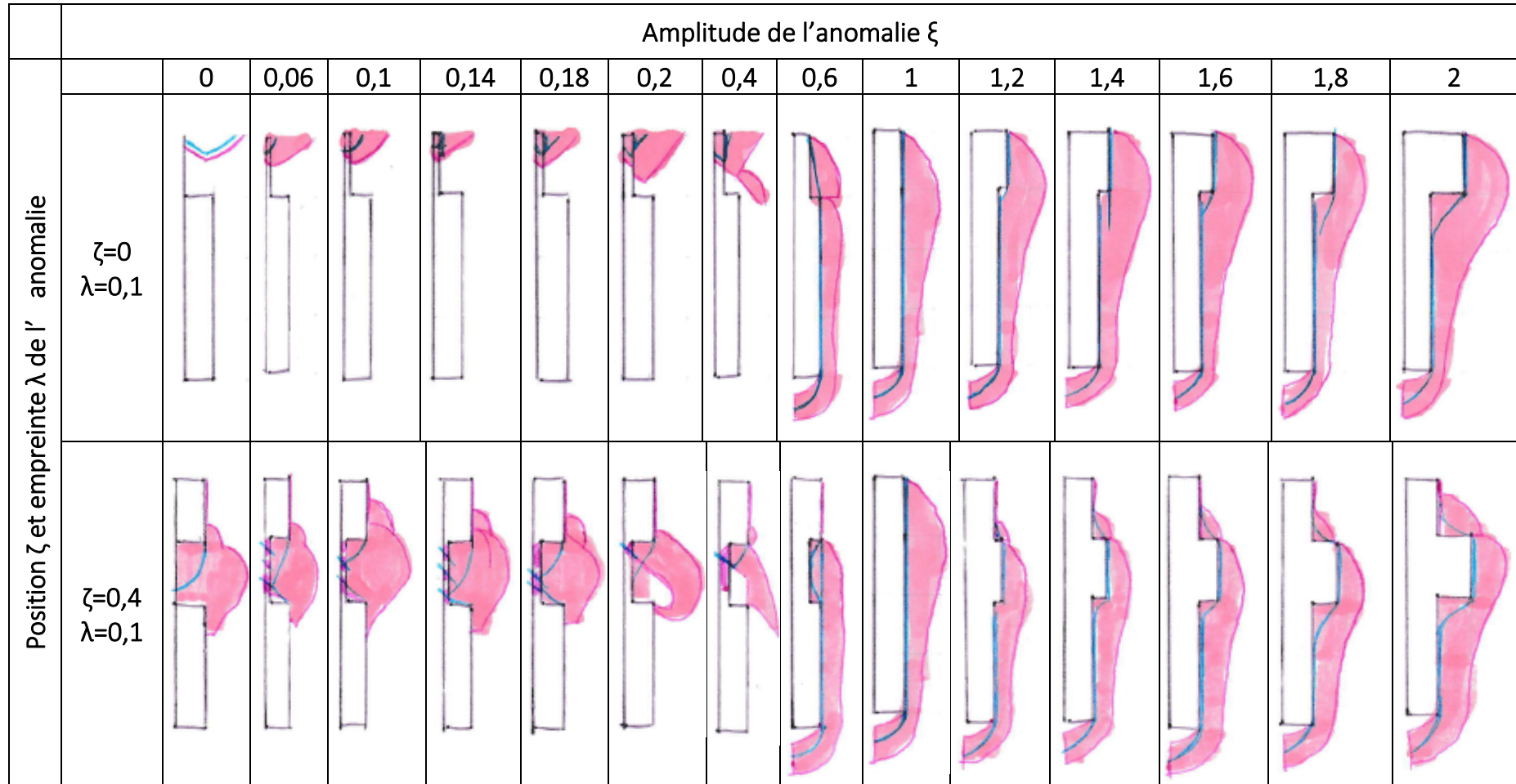


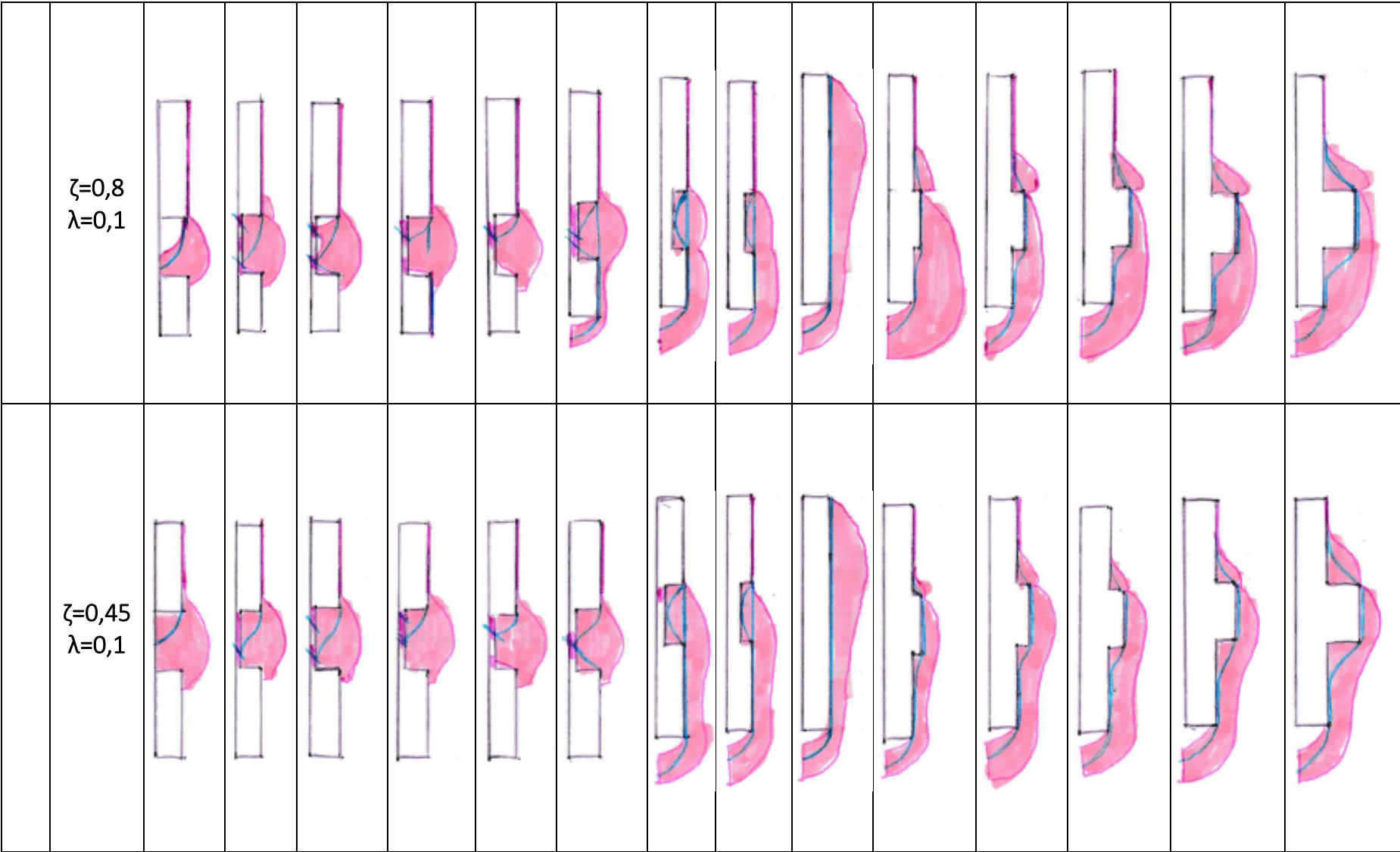


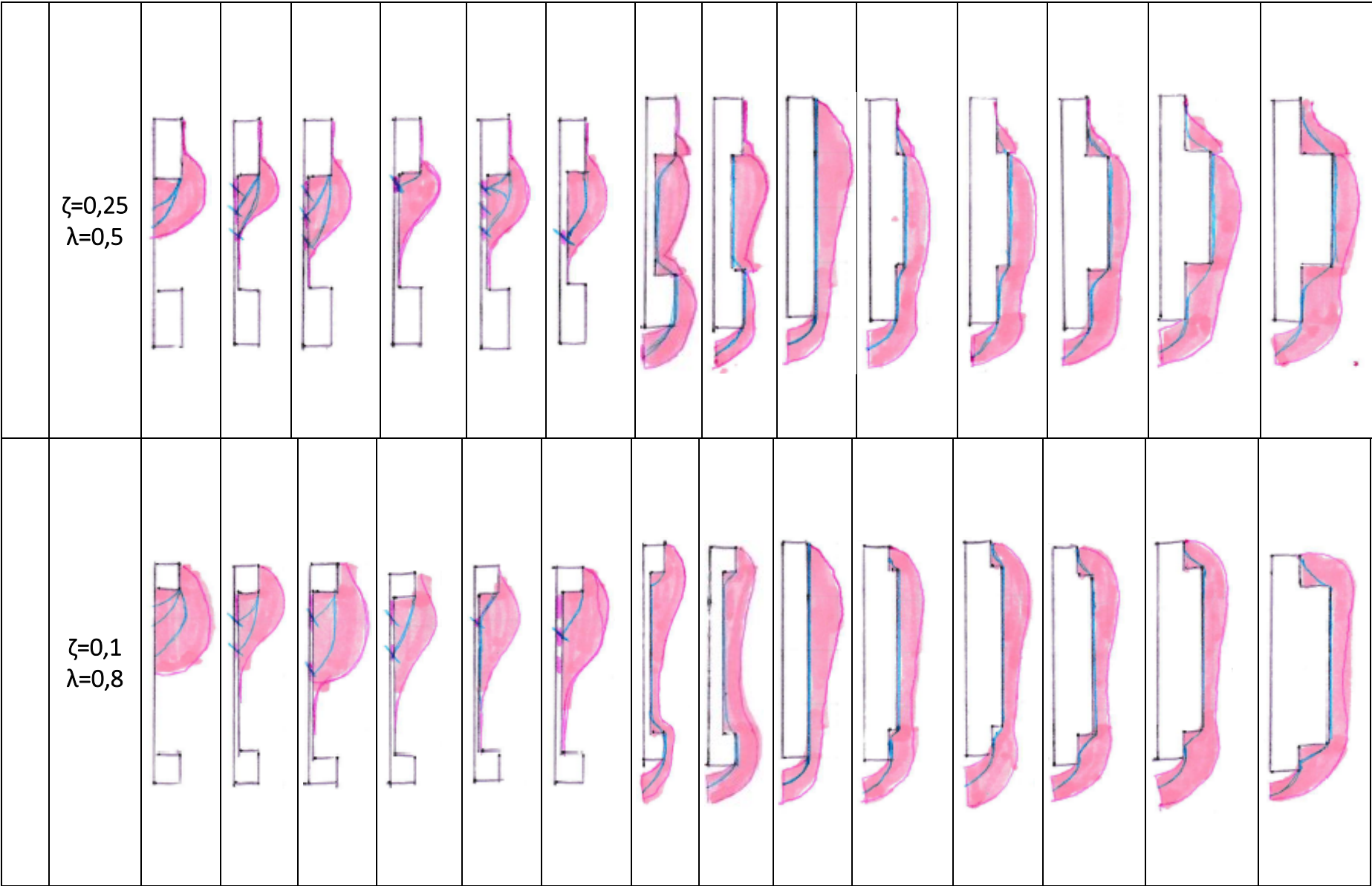


Annexe E

Le tableau ci-dessous montre l'évolution des points plastiques en rose et de la rupture par cisaillement en bleu pour les différentes géométries et amplitudes de l'anomalie. Le sol et le béton suivent une loi de Mohr-Coulomb.







UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl