

Modélisations de l'interaction sol-pieux pour le calcul d'impédances dynamiques

Numerical modelling of soil-pile interaction and evaluation of dynamic impedances

Breugnot A., Allagnat D.
Egis Géotechnique, Grenoble, France.

Baguelin F., Schlosser F.
Experts, Fondasol, Paris, France.

Osmani E., Servant C.
Eiffage, Neuilly s/Seine, France.

RÉSUMÉ : Pour le projet du Grand Stade de Lille, deux méthodes ont été appliquées pour déterminer les impédances des pieux sous les sollicitations dynamiques. Ces méthodes, qui tiennent compte du comportement fortement non-linéaire des sols, selon une loi de dégradation des modules en fonction de la distorsion, sont présentées pour l'impédance horizontale, et leurs résultats comparés. La première, méthode analytique simplifiée, a fourni les valeurs de projet de l'étude d'interaction sol-ouvrage. Celles-ci ont été validées par la deuxième méthode, qui est une modélisation numérique tridimensionnelle par différences finies (Flac3d).

ABSTRACT: For the Grand Stade de Lille project, the dynamic impedances of piles have been determined by two different methods. They both account for the non-linear behaviour of soils, as described by a modulus reduction curve with respect to shear strain. They are presented for the case of the horizontal impedance and their results are compared. The first method, which is simplified and of analytical type, has provided the design values for the soil-structure interaction analysis. These values have been validated by the second method, which is a three-dimensional numerical modelling using finite differences (Flac3d)

MOTS-CLÉS : Fondation, pieux, impédance, dynamique, interaction sol-structure, modélisation numérique.

KEYWORDS: Foundation, pile, impedance, dynamic, soil-structure interaction, numerical modelling

1 INTRODUCTION

Dans le cadre des études des fondations du Grand Stade de Lille Métropole, Eiffage a confié aux bureaux d'études géotechniques Fondasol et Egis Géotechnique la mission de détermination des impédances dynamiques des pieux.

Cette tâche a été conduite en deux temps, utilisant deux approches différentes:

- des modèles analytiques simplifiés ont d'abord été élaborés par Fondasol, et ont permis de donner rapidement des valeurs de référence, $K_{\text{réf}}$.
- ensuite, une vérification par modélisation numérique a été réalisée par Egis Géotechnique à l'aide du logiciel Flac3D (différences finies, Itasca 2009).

Dans cet article, on se limite à la question de la détermination des impédances horizontales K_x . La géologie et les caractéristiques géomécaniques du site, les systèmes de fondations sur pieux sont d'abord présentés. Puis on expose, successivement pour la méthode analytique et pour la modélisation numérique, les méthodologies de calcul et les valeurs obtenues pour K_x , avec une comparaison des résultats.

2 CONTEXTE

1.1 Géologie

Le site d'implantation du Grand Stade de Lille présentait en surface, sur une épaisseur de l'ordre de 6m, des formations superficielles (limons, sables et remblais), qui ont été intégralement décaissées jusqu'à la tête d'un horizon crayeux compact. Dans la couche de craie sableuse à marneuse d'une épaisseur de 15 à 17m environ, des galeries partiellement

comblées ont été rencontrées (éboulis crayeux, coulis de remplissage). En deçà, des marnes compactes ont été reconnues.

Le niveau de nappe est situé à plus de 10m de profondeur par rapport au toit de l'horizon crayeux.

1.2 Fondations

L'ouvrage est fondé sur des pieux forés, de longueur 15 à 20m, dont la tête correspond au toit de l'horizon crayeux et dont l'ancrage se situe au-delà des terrains décomprimés par la présence d'anciennes galeries, partiellement comblées par un coulis de remplissage. Les pieux, au nombre de 821, se répartissent en 297 pieux de diamètre 0,52m, 132 de diamètre 0,62m, 215 de diamètre 0,72m et 177 de diamètre 0,92m. Au droit de chacun des quatre poteaux (appelés « méga-poteaux ») supportant l'ensemble de la charpente, le système de fondation est composé d'un groupe de 8 pieux de diamètre 0,92m, disposés selon un cercle de 6,4m de diamètre. Ces pieux sont considérés parfaitement encastrés dans la semelle. A l'inverse, les pieux des autres fondations sont considérés comme articulés en tête.

1.3 Données géotechniques

Les campagnes de reconnaissances géotechniques initiales ont été complétées par des investigations destinées :

- d'une part à obtenir les paramètres géotechniques de type dynamique, notamment les modules de sol aux faibles déformations. Ainsi 3 sondages cross-hole ont été réalisés.

- d'autre part à effectuer un zonage plus précis du module pressiométrique E_m , base de l'estimation des modules de sols aux déformations habituelles, de l'ordre du pourcent. Pour ce faire, 36 sondages pressiométriques ont été réalisés.

Les modules pressiométriques E_m , donnent les modules statiques, d'Young E_{stat} et de cisaillement G_{stat} par :

$$E_{stat} = \frac{2E_m}{\alpha} \quad G_{stat} = \frac{E_{stat}}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

Le paramètre α est le coefficient rhéologique de la méthode pressiométrique. Le coefficient de Poisson ν a été fixé à 0.33. Dans le domaine des très petites déformations, de l'ordre de 10^{-5} , les essais cross-hole permettent de déduire le module de cisaillement maximal G_{max} et le coefficient de Poisson ν à partir des vitesses des ondes de cisaillement V_s et de compression V_p , et de la masse volumique ρ , selon les Equations 2.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad \nu = \frac{2 - V_p^2 / V_s^2}{2 - 2 V_p^2 / V_s^2} \quad (2)$$

La corrélation entre G_{max} et le module pressiométrique E_m a donné dans la majorité des cas un rapport G_{max}/E_m d'environ 9, valeur classique, mais, en partie supérieure de l'horizon crayeux, on a observé sur deux sondages, entre 5m et 15m de profondeur, des valeurs plus élevées, de 20 ou plus.

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser la déformabilité des matériaux en « statique » ou à très petites déformations sont récapitulées dans le Tableau 1 pour la zone Sud, une des 3 zones définies à partir des sondages cross-hole. Un zonage plus précis, comportant 7 zones, a été établi à partir des sondages pressiométriques.

Tableau 1. Synthèse du modèle géotechnique défini pour la zone Sud de l'ouvrage.

	Craie tendre	Craie sableuse	Marne 1	Marne 2
Epaisseur (m)	7	8	8	-
ρ (kg/m ³)	1800	1900	2000	2000
V_s (m/s)	510	870	830	640
G_{max} (MPa)	470	1440	1380	820
ν (-)	0.38	0.38	0.42	0.44
E_m (MPa)	50	120	150	150
α (-)	1/2	2/3	2/3	2/3
E_{stat} (MPa)	200	360	460	460
G_{stat} (MPa)	70	130	160	160

Pour les déformations intermédiaires, on fait appel à une interpolation suivant une loi dite de dégradation des modules, indiquée ci-après.

1.4 Loi de dégradation des modules

Pour les deux approches, méthode analytique et modélisation numérique, et à défaut de données bibliographiques concernant l'évolution du module élastique dans les craies et les marnes, la loi simplifiée illustrée à la Figure 1 a été retenue pour tous les sols. Les seuils de distorsion sont : $\gamma_{max} = 10^{-5}$ et $\gamma_{stat} = 10^{-2}$. Dans ces conditions, la loi est caractéristique d'un matériau de type « sable » ou « argile peu plastique ».

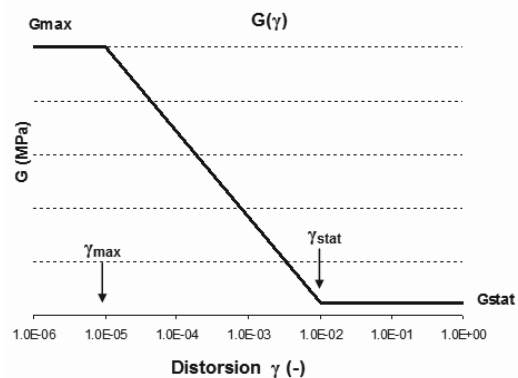


Figure 1. Loi de dégradation des modules simplifiée.

2 METHODE ANALYTIQUE – VALEURS DE PROJET

2.1 Méthodologie de calcul

Dans la méthode analytique, l'évaluation de l'impédance horizontale K_x a été développée à partir de deux bases :

- La solution du pieu infiniment long, de diamètre B , soumis à une charge horizontale F_x en tête, avec un module de réaction k constant, reliant à une profondeur donnée la réaction p et le déplacement horizontal u_x . Le pieu est soit articulé en tête, soit encastré dans le chevêtre sans rotation.

$$p = k \cdot u_x \quad \text{ou} \quad p = K_f / B \cdot u_x \quad (3)$$

- L'étude théorique du mécanisme de réaction latérale des pieux (Baguelin, Frank, Saïd, 1977).

La solution (a) donne la longueur élastique de transfert L_0 et le déplacement en tête u_{x0} , le moment maximal M_{max} , et l'impédance K_x , en fonction de K_f , du module du béton du pieu E_b ($=30000$ MPa) et du module d'inertie I ($=\pi B^4/64$):

$$L_0 = [4 E_b \cdot I / K_f]^{0.25} \quad (4)$$

$$u_{x0} = n F_x / L_0 / K_f \quad n = \{2 ; 1\} \quad (5)$$

$$M_{max} = m F_x L_0 \quad m = \{0.32 ; 1\} \quad (6)$$

$$K_x = K_f L_0 / n \quad n = \{2 ; 1\} \quad (7)$$

Par convention d'écriture, le paramètre n ou m prend la première valeur entre crochets $\{ \}$ pour le pieu articulé en tête, la deuxième valeur pour le pieu encastré en tête.

L'étude (b) donne la distorsion γ au bord du pieu et permet de la relier au déplacement u_{x0} . Après diverses transformations des équations originelles, on obtient les relations :

$$\gamma = u_{x0} / B \cdot 2(1+\nu) / \pi \cdot s \quad (8)$$

$$s = 0.808 + 0.265 \ln(k L_0 / B) \quad k = \{7/15; 12/15\} \quad (9)$$

Pour un effort en tête donné F_x , on tient compte de la non-linéarité des modules (loi de dégradation) par un processus itératif. La valeur initiale de K_f est la valeur statique $K_f(stat)$ habituelle (courte durée d'application), donnée par la méthode pressiométrique, en prenant en compte une valeur moyenne du module E_m sur la couche superficielle, sur 2 à 4m d'épaisseur :

$$K_f(stat) = \frac{12 E_m}{4 \frac{0.6}{3 \max(0.6; B)} \left(2.65 \frac{\max(0.6; B)}{0.6} \right)^\alpha + \alpha} \quad (10)$$

On obtient une première valeur γ_1 de la distorsion, en général inférieure à la valeur γ_{stat} du diagramme de la loi de dégradation (Figure 1), ce qui donne un coefficient multiplicateur $M_{1,1}$, que l'on applique au module $K_f(stat)$:

$$M_i = G\{\gamma_i\}/G\{\gamma_{stat}\} \quad (11)$$

$$K_{f,i} = M_i \cdot K_f(stat) \quad (12)$$

On continue par itérations : partant de M_{i-1} et de $K_{f,i-1}$, on obtient M_i et $K_{f,i} = M_i \cdot K_f(stat)$ à la $i^{\text{ème}}$ itération. Il suffit en général de 4 ou 5 itérations pour obtenir la convergence à mieux de 1/1000. Avec les données du projet, la valeur finale de M s'est établie entre 4 et 7, selon les zones et les efforts appliqués, avec en particulier un rapport G_{max}/E_m très variable.

2.2 Application au projet

Le Tableau 2 montre quelques résultats fournis comme valeurs de référence pour le projet. Pour les mégapoteaux, un coefficient d'effet de groupe de 0.75 à 0.8 a été proposé sur la base des règles du Fascicule 62 titre V du CCTG.

Tableau 2. Exemples de valeurs de référence de la raideur horizontale

condition en tête		diamètre	E_m	G_{max}/E_m	F_x (pieu isolé)	
					200 kN	400 kN
Raideur K_x						
encastré	mégapoteau SO	0.92 m	60 MPa	20	3903 MN/m	3325 MN/m
articulé	pieu zone AF	0.52 m	15 MPa	"	162 MN/m	99 MN/m
		0.72 m	"	"	304 MN/m	239 MN/m
		0.92 m	"	"	480 MN/m	402 MN/m
	pieu zone AD	0.52 m	50 MPa	"	540 MN/m	436 MN/m
		0.72 m	"	"	926 MN/m	792 MN/m
		0.92 m	"	"	1409 MN/m	1238 MN/m
	pieu zone AM	0.52 m	70 MPa	"	739 MN/m	612 MN/m
		0.72 m	"	"	1250 MN/m	1084 MN/m
		0.92 m	"	"	1890 MN/m	1676 MN/m

La comparaison des valeurs de K_x issues du modèle analytique et de celles issues de la modélisation numérique est fournie en fin du § 3.

Les valeurs de K_x relatives à un effort moyen $F_x=200$ kN ont été retenues, et une fourchette a été appliquée aux valeurs de référence : $K_{x(min)}=2/3.K_x(\text{réf.})$ et $K_{x(max)}=1.5 K_x(\text{réf.})$. Il a été proposé de négliger l'amortissement.

A l'issue de l'étude d'interaction, les pieux ont été vérifiés vis-à-vis de l'effort $\{N, M, T\}$, combinant une composante statique correspondant aux efforts permanents et une composante dynamique. La variation de ces grandeurs avec la profondeur le long du pieu est telle que la valeur maximale a lieu en tête, sauf pour le moment dans le cas du pieu articulé. Dans le cas général, il est donc aisé de combiner les valeurs en tête des deux composantes pour obtenir la valeur maximale résultante. Il n'en va pas de même pour le moment du pieu articulé en tête, le moment maximal (Eq. 6) a lieu à la profondeur $z_{max} = \pi/4.L_0$, fonction de la longueur élastique L_0 , et la valeur à la profondeur z dépend aussi de L_0 et elle est donnée par :

$$M(z) = F_x L_0 \exp(-z/L_0) \sin(z/L_0) \quad (13)$$

Les longueurs élastiques L_0 étant différentes pour les deux composantes, il faut associer deux fonctions de z pour déterminer le moment maximal et sa profondeur correspondant à la combinaison statique + dynamique.

3 MODELISATION NUMERIQUE – VALIDATION DES VALEURS DE PROJET

3.1 Méthodologie de calcul

Les impédances de fondation, ou ressorts équivalents, K , sont définies comme le rapport entre l'effort (force ou moment) appliqué en tête de fondation P , et le déplacement correspondant U (translation ou rotation) :

$$K = \frac{P}{U} \quad (14)$$

Une méthode statique et une méthode dynamique sont étudiées conjointement dans le but de calculer les raideurs dynamiques des fondations sur pieux, en tenant compte à la fois de la stratification détaillée du sol, du torseur d'effort induit dans les fondations et des fréquences des modes de réponse de la structure.

Le logiciel Flac3D (différences finies) (Itasca 2009) est utilisé pour la modélisation numérique. Une illustration du modèle est donnée Figure 2.

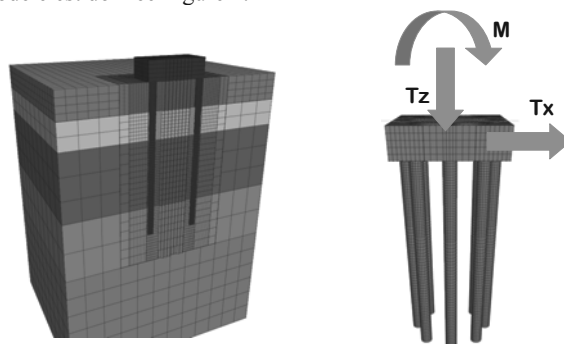


Figure 2. Modèle numérique des fondations constituées d'un groupe de pieux et représentation d'un torseur appliqué.

Dans le calcul statique, la prise en compte de la non linéarité du comportement du sol repose sur un processus itératif permettant d'évaluer, pour un chargement donné, la distorsion et le module associé dans chaque maille de sol du modèle numérique 3D, par application de la loi de dégradation (Figure 1). L'hypothèse d'élasticité est vérifiée a posteriori. La résistance à la traction dans le sol a été annulée de telle façon que l'interaction pieu-sol ne fasse pas intervenir de traction. Le béton des pieux est modélisé par une loi élastique linéaire caractérisée par les propriétés « instantanées » du béton : $E_{\text{béton}} = 32\,500$ MPa ; $\nu_{\text{béton}} = 0.2$; $\rho_{\text{béton}} = 2500$ kg/m³.

Les variations du taux de distorsion γ et du module de cisaillement G dans le sol autour de la tête d'un pieu sont illustrées Figure 3, dans le cas d'un pieu soumis à un effort horizontal. A noter que la dégradation du module élastique n'est significative que sur les premiers mètres de sol (sur une épaisseur de l'ordre de 2.5 à 5B).

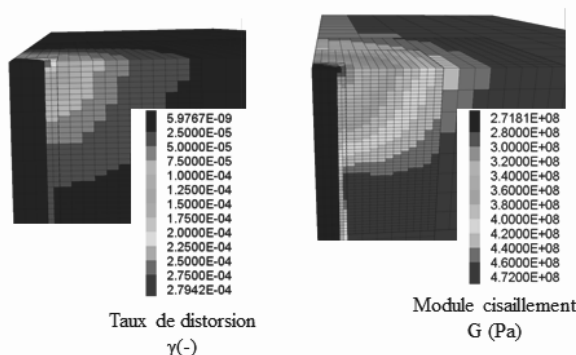


Figure 3. Représentation du taux de distorsion γ et de la dégradation du module de cisaillement G induit par la non-linéarité du comportement du sol.

Dans le calcul dynamique, un déplacement harmonique $u(t)$ de pulsation ω (voir Eq. 15) est imposé en tête de fondation et la réaction correspondante $p(t)$ est calculée. Les fonctions d'impédances $K(\omega)$ sont des nombres complexes, et sont définies comme le rapport des transformées de Fourier de la réaction $p(t)$ et du déplacement imposé $u(t)$ (Eq. 15).

$$u(t) = A \sin(\omega t) \quad K(\omega) = \frac{TF[p(t)]}{TF[u(t)]} \quad (15)$$

Dans ce contexte, la fondation est représentée par un ressort couplé à un amortisseur, définis pour chaque pulsation testée.

Dans ce qui suit, seules les raideurs fréquentielles seront présentées.

Les modules élastiques introduits dans un calcul dynamique sont ceux issus d'un calcul statique correspondant, en tenant compte que le modèle retenu est élastique dans l'approche dynamique. L'amortissement interne du sol (classiquement de l'ordre de 2 à 10 %) est modélisé par un amortissement visqueux de type Rayleigh.

3.2 Résultats d'impédance horizontale K_x . Comparaison des valeurs des deux méthodes

Le Tableau 3 montre les valeurs de l'impédance statique K_x données par les deux méthodes, analytique et numérique, pour un pieu isolé, avec des paramètres géotechniques moyens correspondant à la zone Sud.

Tableau 3 : Raideurs statiques K_x (en MN/m).

diamètre B	Effort F_x Liaison	200 kN articulée		400 kN articulée		400 kN encastrée	
		méthode analytique	méthode numérique	méthode analytique	méthode numérique	méthode analytique	méthode numérique
0.52 m		337	380	282	340	-	-
0.92 m		854	800	762	730	1661	1310

Il s'avère que les valeurs de la méthode analytique se situent entre 83% et 107% des valeurs statiques de la modélisation numérique. Elles rentrent donc dans la fourchette 66% - 150% prise en compte dans les calculs d'interaction fondations-ouvrage.

En réalité, les valeurs de projet ont été légèrement différentes des valeurs théoriques de la méthode analytique. La raison en est que le paramètre 's' (Eq. 9) a été fixé à partir d'une valeur moyenne du rapport L_0/B en statique, alors que, dans la méthode, il doit découler d'une valeur L_0/B "dynamique", résultant des itérations. Pour l'effort $F_x=200$ kN, retenu en projet pour tous les types de pieux, il en résulte une sous-évaluation des valeurs « projet », d'environ 5% pour le pieu articulé, d'environ 12% pour le pieu encastré. Les valeurs « projet » ne sortent donc pas de la fourchette admissible.

A noter également que la liaison en tête des pieux (fonction des dispositions constructives permettant la transmission des moments) est un paramètre majeur du calcul.

Par ailleurs, le coefficient de groupe pour les fondations des mégapoteaux a été estimé à 0.85 en projet, alors qu'il a été calculé à 0.55 par la modélisation numérique, donnant au final un rapport 1.65 entre valeur de projet et valeur de la modélisation numérique, rapport qui dépasse légèrement la limite supérieure de la fourchette de tolérance.

Le tableau 4 donne les valeurs de l'impédance dynamique données par le calcul dynamique dans la gamme de fréquence [0.5 Hz à 5 Hz].

Tableau 4 : Impédance dynamique K_x (en MN/m) pour $F_x = 400$ kN et un pieu articulé

Fréquence :	0.5 Hz	2 Hz	5 Hz
B = 0.92m	690	720	720

On voit que l'influence de la fréquence sur la valeur de l'impédance horizontale reste limitée, environ 5%, dans le domaine des basses fréquences qui donne des efforts d'interaction significatifs sur les fondations. Ceci justifie a posteriori de l'avoir négligée en valeurs K_x « projet ».

L'amortissement correspondant au mode de translation horizontal reste limité (<2%) sur le domaine fréquentiel étudié.

3.3 Autres résultats de la modélisation numérique

La modélisation numérique a fourni aussi des résultats pour l'impédance verticale K_z , correspondant à un mode de translation verticale. Une approche analytique simplifiée a

également été développée pour ce paramètre, donnant des valeurs « projet » se situant à environ 120% des valeurs de la modélisation numérique pour les pieux isolés. Mais pour les pieux en groupe des mégapoteaux, dans l'approche simplifiée, le coefficient d'efficacité a été estimé à 0.75 d'après les règles du Fascicule 62 titre V du CCTG, alors que la modélisation numérique aboutit à environ 0.66. Il en résulte une surestimation d'environ 36% par les valeurs de projet. L'incidence sur l'effort vertical d'interaction F_z est moindre (moins de 10%).

En ce qui concerne les fondations supportant les mégapoteaux (groupe de 8 pieux), l'influence de la fréquence sur le calcul des impédances n'est pas plus significative que pour un pieu isolé (voir Tableau 5).

Tableau 5 : Impédance dynamique (en MN/m) du mode de translation verticale ($F_z = 600$ kN) pour un groupe de 8 pieux de la zone Sud de l'ouvrage.

Fréquence :	0.5 Hz	2 Hz	5 Hz
$d_{\text{pieux}} = 0.92\text{m}$ (8 pieux)	24 000	23 900	23 400

4 CONCLUSION

La méthode analytique simplifiée élaborée par Fondasol pour la détermination de l'impédance horizontale K_x des pieux tient compte de la loi de dégradation des modules de sol. Elle s'applique à des pieux avec des conditions de liaison en tête simples (articulation ou encastrement sans rotation) et elle nécessite la connaissance, en tête de pieu, du module pressiométrique et du module G_{max} aux très petites déformations. Elle a fourni les valeurs de projet des 821 pieux de l'ouvrage.

La modélisation numérique tridimensionnelle mise en œuvre par Egis Géotechnique à l'aide du logiciel Flac3D permet de tenir compte du comportement non linéaire et de la stratification détaillée des sols, des géométries complexes (effet de groupe) et de l'effet inertiel d'une sollicitation dynamique. Elle a permis de valider les valeurs de projet proposées. La faible incidence de la fréquence sur la valeur de l'impédance, dans le domaine des basses fréquences, pertinentes pour l'interaction fondations-ouvrage, a pu être démontrée.

5 REFERENCES

- Baguelin, F., Frank, R., Saïd, Y.H. (1977), "Theoretical study of lateral reaction mechanism", *Géotechnique* 27, No.3, pp.405-434
- Fascicule 62 titre V du CCTG (1993), "Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de Génie Civil", Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports.
- Itasca Consulting Group. 2009. Flac3D v4.0. Theory and Background. Dynamic analysis. Minneapolis, Minnesota USA.