

# FROTTEMENT NEGATIF : VERS UNE EVOLUTION DE SA PRISE EN COMPTE DANS LE DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS PROFONDES

## ***DOWNDRAG: TOWARD AN EVOLUTION OF ITS CONSIDERATION DURING DESIGN OF DEEP FOUNDATIONS***

Julien Habert<sup>1</sup>, Samuel Heumez<sup>2</sup>, Dominique Batista<sup>3</sup>, Fahd Cuira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Setec\Terrasol, Paris, France

<sup>2</sup> Cerema, Direction Territoriale Ile de France, Paris, France

<sup>3</sup> Cerema, Direction Territoriale Méditerranée, Aix-en Provence, France

**RÉSUMÉ** – Cet article présente des réflexions sur la prise en compte des effets du phénomène de frottement négatif dans le cadre du dimensionnement des fondations profondes. L'évolution des moyens de modélisation, et notamment la prise en compte plus répandue de l'interaction sol-structure, conduit à proposer une évolution des approches pour modéliser et justifier les ouvrages soumis aux effets du phénomène de frottement négatif. En l'état, trois approches de complexité croissante sont ainsi proposées, permettant d'adapter la complexité des calculs à l'importance et aux enjeux de l'ouvrage, le tout complété par une adaptation des formalismes de vérifications de la capacité portante. Ces approches sont ensuite mises en œuvre sur un cas pratique, comparées entre elles et aux méthodes actuellement utilisées.

**ABSTRACT** – This paper presents development concerning negative skin friction assessment during the design of deep foundations. Evolution of modelling capacities, especially the accounting for soil-structure interaction, leads to propose alternative approaches to model and verify assets subjected to the effects of negative skin friction. Three approaches with a progressive complexity are thus proposed, allowing to adapt the calculation complexity with the importance of the asset considered, together with some amendments of the bearing capacity checks. These approaches are implemented on a case study, compared to each other and to currently used approaches.

### 1. Introduction

Le phénomène de frottement négatif doit être considéré quand des tassements complémentaires des terrains de fondation se produisent alors que les fondations profondes sont déjà en place.

Ces tassements complémentaires sont en premier lieu induits par la mise en place de remblais autour de l'ouvrage fondé sur pieu : un exemple typique est le cas d'un remblai d'accès à une culée d'ouvrage d'art fondée profondément, construit après la culée et ses fondations, qui conduit à des tassements des sols supports, se traduisant à leur tour par des effets additionnels sur les fondations profondes.

D'autres phénomènes peuvent être à l'origine de tassements additionnels des sols supports, comme i) les travaux de rabattement de nappe qui conduisent à augmenter la contrainte effective et ii) les déplacements (comportant une composante verticale) liés à des excavations à proximité de fondations profondes.

Les effets additionnels liés au frottement négatif correspondent principalement à deux sujets : i) d'abord des tassements additionnels en tête de fondations profondes et ii) ensuite une augmentation de l'effort axial (effort ainsi appelé frottement négatif) dans les éléments de fondation profonde.

Le présent article revient sur la procédure actuelle d'évaluation du frottement négatif et de sa prise en compte. Une analyse de la méthode d'évaluation du frottement négatif est

ensuite proposée au regard des méthodes de modélisation actuellement mises en œuvre dans le domaine de l'ingénierie géotechnique : sur cette base, trois approches alternatives de complexité croissante sont ainsi proposées pour estimer le frottement négatif, permettant d'adapter la complexité des calculs à l'importance et aux enjeux de l'ouvrage. Ces trois approches sont ensuite mises en œuvre sur un cas pratique, comparées entre elles et aux méthodes actuellement utilisées.

## 2. Pratique française

### 2.1. Origine de la pratique

En France, la prise en compte du frottement négatif repose en premier lieu sur des observations expérimentales sur des fondations d'ouvrage d'art (Combarieu, 1985), dont les enseignements ont été transcrits dans les différents textes normatifs relatifs à la justification des pieux : aujourd'hui c'est la norme d'application nationale de l'Eurocode 7 relative à la justification des pieux, NF P94-262 datant de 2012, qui traite ce sujet.

### 2.2. Contenu

Les procédures ainsi décrites pour traiter du frottement négatif reposent sur plusieurs étapes :

1. Une estimation des effets du phénomène de frottement négatif, au travers de l'évaluation de l'augmentation de l'effort axial, et de façon associée la profondeur de l'effort axial maximal (profondeur correspondant au point neutre, au-dessus duquel les tassements du sol sont plus importants que ceux du pieu, conduisant à des frottements sol-pieu qui sont négatifs), sur la base :
  - a. De valeurs des frottements négatifs unitaires (unitaires signifiant ici « maximaux » ou mobilisables, au prix d'un déplacement relatif sol-pieu suffisant) estimés différemment des valeurs considérées pour l'estimation des frottements positifs :
    - Si les frottements sont positifs (c'est-à-dire qu'ils contribuent à la capacité portante), leurs valeurs unitaires sont communément évaluées au travers de méthodes semi-empiriques basées sur les résultats des essais in situ (pression limite pressiométrique Ménard  $p_{IM}^*$  ou la résistance de pointe pénétrométrique  $q_c$ ) ;
    - Si les frottements sont négatifs, leurs valeurs unitaires sont dérivées de la contrainte verticale à l'interface sol-pieu et un coefficient empirique  $K \tan \delta$  dépendant du type de sol et de pieu :
      - Prises à leur valeur maximale => méthode 1a),
      - Ou éventuellement modulées par la part d'effort transitant dans le pieu, par l'intermédiaire des phénomènes dits « d'accrochage » => méthode 1b),
  - b. De développements ne tenant pas compte de l'interaction sol-structure : les frottements négatifs considérés ne dépendent ainsi pas de l'amplitude du tassement relatif sol-pieu mais correspondent aux valeurs unitaires décrites ci-dessus.
2. D'une modification des conditions de vérification de portance, consistant à revoir conjointement la descente de charge et la capacité portante :
  - a. La descente de charge verticale est augmentée, en additionnant à la descente de charge en tête le frottement négatif ;
  - b. L'estimation de la capacité portante est quant à elle diminuée, en tenant compte des contributions de résistance uniquement sous le point neutre consistant à comparer l'effort axial maximal dans la fondation à la capacité

portance géotechnique sous la cote à laquelle cet effort axial maximal est obtenu.

### 2.3. Analyse

Les commentaires suivants peuvent être émis :

- Les frottements négatifs se traduisent d'abord par des tassements supplémentaires, qui constituent, dès que la structure y est sensible, le paramètre important qu'il convient d'estimer (Fellenius, 1974). Cette estimation nécessite de fait des calculs d'interaction sol-structure, qui d'une part sont désormais courants du fait des outils disponibles pour les réaliser, mais sont aussi suggérés par les travaux en cours de révision de l'Eurocode 7 (visant à publier une seconde version en 2027) ;
- Dans le prolongement de l'argument précédent, la portance d'un pieu n'est pas modifiée par le frottement négatif (également Fellenius, 1974) : si le pieu est chargé de façon trop importante par rapport à sa résistance, l'enfoncement associé va se traduire par un pieu tassant de nouveau plus que le sol, et donc une réduction voire une disparition des frottements négatifs ;
- Les expérimentations négligeant l'interaction sol-structure peinent à reproduire les expérimentations (Combarieu, 1985), et nécessitent de moduler par exemple le paramètre  $K_{tan\delta}$  en fonction du degré de consolidation des terrains autour des fondations profondes ;
- De nombreux phénomènes sont susceptibles de conduire à des frottements négatifs, au-delà de l'aménagement de remblais, ce qui nécessite de trouver un formalisme universel, applicable à ces différentes sources et amplitudes de frottements négatifs et d'adapter les méthodes de calcul ;
- Une discordance forte est mise en évidence concernant l'estimation des frottements axiaux unitaires selon qu'ils soient positifs ou négatifs, alors que les méthodes d'estimation du comportement du pieu sous charge axiale basées sur les résultats d'essais in situ sont fiables, tant concernant l'estimation des résistances (Burlon et al., 2012) que leur mobilisation progressive avec l'enfoncement du pieu (Abchir et al., 2014).

Pour dépasser les limitations précédemment évoquées, les développements ci-dessous sont proposés pour estimer les effets du phénomène de frottement négatif.

## 3. Approche alternative proposée

Plusieurs éléments sont proposés concernant :

- les approches de modélisation pour obtenir le frottement négatif  $G_{sn}$ ,
- les vérifications exigées en termes de portance et la validation des estimations de tassement.

### 3.1 Approches de modélisation

#### 3.1.1 Principe

Trois approches de modélisation de complexité croissante sont ainsi proposées :

- La première approche, similaire à la méthode simplifiée,
- La deuxième approche ajoute à l'approche précédente la modélisation du comportement du pieu sous sollicitation axiale, en reprenant les méthodes disponibles pour l'évaluation,
- La troisième et dernière approche complète l'approche précédente en introduisant l'effet d'accrochage.

Quelle que soit l'approche, le frottement axial négatif unitaire  $q_s$  est estimé de façon identique au frottement axial unitaire positif, et est donc classiquement estimé en fonction

de la pression limite pressiométrique Menard nette  $p_{IM}^*$  ou de la résistance de pointe pénétrométrique statique  $q_c$  (AFNOR, 2012), et en tenant compte de la technique d'exécution des fondations profondes.

Afin de conserver un calcul du côté de la sécurité pour l'estimation du frottement négatif  $G_{sn}$  assimilable à une action, le frottement axial unitaire  $q_s$  au-dessus du point neutre doit par ailleurs tenir compte :

- De valeurs hautes de l'estimation de la résistance du terrain,
- Des variations de ces propriétés mécaniques éventuelles au cours de la vie de l'ouvrage (et conduisant à des différences sensibles par rapport aux propriétés mécaniques mesurées lors des campagnes de reconnaissance réalisées pendant les phase d'étude), par exemple sous l'effet de la consolidation.

### 3.1.3 Méthode simplifiée (méthode 2a)

La première approche reprend le principe de la méthode simplifiée actuellement utilisée : au-dessus du point neutre, le frottement axial est pris égal au frottement axial unitaire (supposant ainsi les déplacements relatifs sol-pieu suffisamment importants pour mobiliser pleinement ce frottement axial). Le frottement négatif  $G_{sn}$  est calculé en intégrant les frottements axiaux unitaires au-dessus du point neutre, de profondeur  $z_{PN}$ , dont la position est estimée selon les errements habituels.

### 3.1.4 Mise en œuvre calcul d'interaction sol-structure (méthode 2b)

La deuxième approche ajoute à l'approche précédente la modélisation du comportement du pieu sous sollicitation axiale, en reprenant les méthodes disponibles pour l'évaluation du comportement du pieu sous charge axiale : un calcul aux fonctions de transfert peut en particulier être développé de façon générale, dans le prolongement des calculs couramment implémentés pour l'estimation du comportement des pieux sous chargement axial (Alonso et al., 1984) et adapté en tenant compte des développements propres au pressiomètre (Frank et Zhao, 1982, Habert et al., 2014).

Cette approche nécessite :

- D'estimer le profil de tassement libre du sol  $w_s(z)$ , estimé sans la présence des fondations profondes, par toute autre méthode éprouvée
- De compléter les lois t-z classiquement utilisées pour la mobilisation du frottement positif pour des configurations où le tassement du sol est plus important que celui du pieu, et en résolvant l'équation suivante (1) traduisant l'équilibre du pieu.

$$ES \frac{d^2 w_p}{dz^2} + P f_\tau(w_p - w_s) = 0 \quad (1)$$

Où  $ES$  est le produit du module d'Young et de la section du pieu,  $P$  son périmètre,  $f_\tau$  la fonction de mobilisation du frottement axial en fonction du tassement relatif pieu-sol  $w_p - w_s$ . Cette modélisation doit également considérer les conditions aux limites :

- Sous la base, la fonction de mobilisation de la réaction en pointe
- Le chargement en tête : en première approche, un seul calcul peut être mené correspondant à l'effort quasi-permanent en tête, permettant d'obtenir le tassement en tête, mais aussi la position du point neutre et l'effort de frottement négatif associée  $G_{sn}$ , ce dernier pouvant alors ensuite être réintroduit dans les différentes combinaisons d'action.

### 3.1.5 Effets d'accrochage (méthode 2c)

Pour terminer, les effets d'accrochage peuvent être considérés pour traiter les effets de groupes de pieux (infinis voire finis) soumis à du frottement négatif, selon les adaptations actuellement proposées (Combarieu, 1974).

En cas de calcul d'interaction sol-structure, cela consiste à réestimer le tassement libre du sol  $w_s(z)$  en tenant compte de la contrainte verticale effective à l'interface sol pieu tenant compte de l'effet d'accrochage.

### 3.2 Vérification de la portance et éventuelle réestimation des déplacements.

#### 3.2.1 Principe général

En parallèle, le principe de vérification de la portance est modulé selon les éléments présentés ci-dessous.

- Aucune vérification de portance additionnelle par rapport au cas sans frottement négatif n'est nécessaire « et ce en particulier » à l'ELU (en revanche l'estimation du frottement négatif  $G_{sn}$  reste nécessaire pour mener les vérifications structurales),
- A l'ELS QP, plusieurs situations peuvent se présenter, qui dans certains cas, vont nécessiter une reprise de l'estimation des déplacements prévisibles.

#### 3.2.2 Vérifications à l'ELS quasi-permanent

En premier lieu, il est regardé si la sollicitation axiale au niveau du point neutre reste inférieure à la capacité portante de calcul sous le point neutre à l'ELS quasi-permanent, selon l'Equation (1). Le qualificatif « de calcul » signifie ici « après limitation à la charge critique de fluage et application des différents facteurs partiels de sécurité à l'ELS, dont le produit est égal à  $\gamma_{ELS}$  », ce dernier étant égal à  $\gamma_{Rd1} \gamma_{Rd2} \gamma_{cr}$  selon le formalisme de la norme NF P94-262) :

$$(V + G_{sn})_{ELS\ QP} \leq \frac{1}{\gamma_{ELS}} \left( 0,7 \int_{z_{PN}}^D q_s(z) P dz + 0,5 \text{ à } 0,7^1 R_b \right) \quad (2)$$

Où  $V$  est l'effort vertical en tête,  $P$  le périmètre du pieu,  $D$  sa longueur (ou la profondeur de sa base).

Si cette première condition est satisfaite, les fondations profondes sont justifiées.

En revanche, si elle n'est pas satisfaite, il convient de se rappeler que cette condition permet en réalité de rester dans le domaine de validité des méthodes d'estimation des tassements, associées à des chargements ne dépassant pas la charge critique de fluage des fondations profondes. Si la condition précédente n'est pas satisfaite, l'estimation des tassements initialement effectuée selon les méthodes citées précédemment n'est donc plus valable, et il est nécessaire de revoir à la hausse (mais plus finement) les tassements prévisibles.

Deux approches alternatives sont alors disponibles, reposant alors sur une seule évaluation des tassements qui se substituent à la vérification en portance actuellement réalisée par habitude (suffisante mais non nécessaire) :

1. Une modélisation rendant compte explicitement des effets du temps (et éventuellement du phasage) peut être développée, afin de réestimer les tassements (et potentiellement revoir dans une certaine mesure et à la baisse le frottement négatif  $G_{sn}$ );
2. Une enveloppe conservatrice des tassements peut également être obtenue en tenant compte implicitement des effets du temps, en bornant dans le calcul d'interaction sol-structure les résistances sous le point neutre (frottements axiaux unitaires  $q_s$  ainsi que la réaction sous la base  $q_b$ ) à leur valeur de calcul (« de calcul » signifiant « après application des différents facteurs partiels de sécurité à l'ELS, dont le produit est égal à  $\gamma_{ELS}$  »). Cette dernière approche est itérative puisque la position du point neutre évolue avec l'extension de la pondération des résistances.

<sup>1</sup> le facteur 0,5 à 0,7 modulant la résistance sous la base  $R_b$  correspond au facteur utilisé pour l'estimation de la charge critique de fluage à partir de la résistance, pris égal à 0,5 et 0,7 pour les pieux respectivement non refoulants et refoulants)

## 4. Application

### 4.1 Présentation

Une application est proposée pour l'étude du frottement négatif sur un pieu isolé, consistant à mettre en œuvre les méthodes historiques 1a et 1b, puis les méthodes 2a et 2b décrites plus haut. Concernant l'estimation des tassements, il est retenu de les estimer de façon conservatrice selon la méthode 2 présentée au §3.2.2 selon les caractéristiques suivantes :

- Un pieu foré à la boue,
- Diamètre égal à 80 cm,
- Supportant une charge ELS QP égale à 1000 kN,
- A proximité d'un demi-remblai de 7 m de hauteur avec un poids volumique de 20 kN/m<sup>3</sup>, édifié après les pieux et qui va générer les phénomènes de frottement négatifs,
- Eau au niveau du TN.

La géologie est constituée des Alluvions Modernes (AM) argileuses reposant sur les Alluvions Anciennes (AA) sableuses, avec les propriétés mécaniques indiquées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Hypothèses géotechniques

	$z$ (m/TN)	$\rho_{IM}^*$ (MPa)	$E_M$ (MPa)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_p - \sigma'_{v0}$ (kPa)	$Ktan\delta^2$
AM	0 - -10	0,3 – 0,5	3 – 8	18,0	1,1	0,15	0,02	50	0,20
AA	10 - > 20	3,0 – 4,0	44 - 60	/	/	/	/	/	

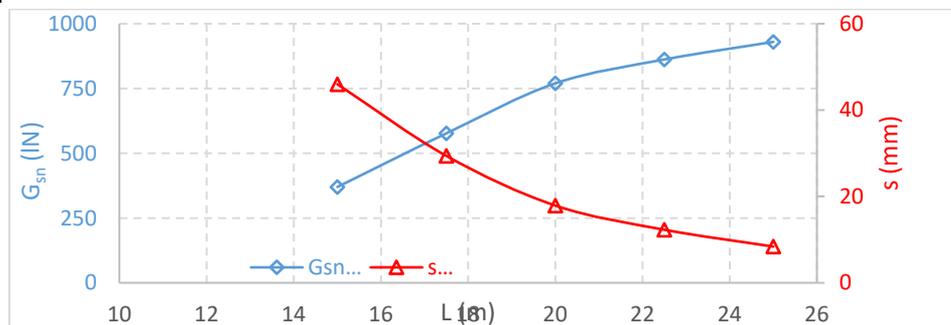
### 4.2 Résultats obtenus

Les paramètres intermédiaires sont les suivants :

- Le tassement libre du sol est égal à 11,0 cm,
- Frottement axiaux unitaires  $q_s$  (cf. AFNOR, 2012):
  - Alluvions Modernes 31 à 43 kPa (selon la valeur de  $\rho_{IM}^*$  considérée. La valeur de 43 kPa peut être comparée à  $Ktan\delta\sigma'_v$  qui varie entre 14 à 30 kPa, soit en moyenne deux fois plus faible, du fait du peu d'éléments permettant d'objectiver cette valeur dans les documents de référence actuels ;
  - Alluvions Anciennes : valeur sécuritaire égale à 90 kPa (valeur de  $q_{s,max}$  issue d'AFNOR, 2012).
- $\gamma_{ELS} = 1,1 \times 1,1 \times 1,15 \approx 1,4$ .

Les résultats présentés dans le Tableau 2 sont alors obtenus selon l'application des différentes méthodes évoquées ci-dessus.

L'évolution du frottement négatif obtenu à partir de l'approche précédente est reportée sur la Figure 1.



<sup>2</sup> Valeur retenue pour pieux forés dans argiles fermes, selon AFNOR, 2012

Figure 1. Evolution frottement négatif  $G_{sn}$  et du tassement en tête du pieu  $s$

Tableau 2. Résultats obtenus

Configuration	L (m)	$G_{sn}$ (kN)	$h/z_n$ (m)	$s$ (mm)	$R_b$ (kN)	$R_s$ (kN)	$R_s^*$ (kN)	$R_{c,d}$ (kN)	$V_{d,ELU}$ (kN)	$R_{c,cr,d}$ (kN)	$V_{d,ELS}$ (kN)
(0) Sans $G_{sn}$	12,4	0	0,0	?	1659	1378	1378	2182	1350	1289	1000
(1a) Méthode actuelle, sans accrochage	17,5	480	8,8	?		2532	1796	2483	1997	1500	1480
(1b) Méthode actuelle, AVEC accrochage	17,5	453	8,8	?		2532	1796	2483	1962	1500	1453
(2a) Proposition méthode simplifiée, sans ISS	22	969	8,8	?		3550	2814	3215	2659	2012	1969
(2b) Proposition méthode simplifiée, AVEC ISS	15,0	370	3,7	46,0		1966	1657	2383	1850	1430	1370
	17,5	577	5,7	29,4		2532	2056	2669	2129	1630	1577
	20,0	770	7,6	17,9		3097	2462	2962	2390	1835	1770
	22,5	862	8,5	12,3		3663	2953	3314	2514	2081	1862
	25,0	930	9,1	8,4		4228	3468	3684	2606	2341	1930

Où  $L$  est la longueur du pieu,  $G_{sn}$  l'effort de frottement négatif,  $s$  le tassement en tête de pieu,  $R_b$  et  $R_s$  les résistances sous la base et par frottement ( $R_s$  étant calculé sur toute la hauteur du pieu tandis que  $R_s^*$  est calculé uniquement sous la hauteur d'application du frottement négatif  $h_2$  ou la position du point nul  $z_N$ ),  $R_{c,d}$ ,  $R_{c,cr,d}$ ,  $V_{d,ELU}$  et  $V_{d,ELS}$  les résistances de calcul et les descentes de charge respectivement à l'ELU et à l'ELS.

Il est à noter que :

- Les valeurs de frottements négatifs apparaissent objectivement faibles au vu des pressions limites  $p_{IM}^*$ , du fait de l'utilisation du paramètre  $Ktan\delta$  « forfaitaire » ;
- Avec l'approche proposée :
  - La longueur nécessaire varie avec l'objectif fixé en termes de tassement. Si un tassement de 25 mm est fixé, une longueur de 18,1 m est suffisante. L'application numérique correspondante (en reportant effort axial, tassements et contrainte tangentielle le long du pieu) est reportée sur la Figure 2 ( $w_p$ ,  $w_s$  et  $w_{p-s}$  étant respectivement le tassement du pieu et du sol, et le tassement relatif entre le pieu et le sol) ;
  - Le frottement négatif dérivé du calcul permettant d'obtenir une évaluation conservative des tassements varie également en fonction de la longueur.

Il est à noter que le calcul précédent concerne l'évaluation conservative des tassements. Pour les vérifications structurales, il convient d'utiliser potentiellement le modèle géotechnique maximisant le frottement négatif et donc l'effort axial (ce qui revient à considérer l'horizon d'ancrage le plus raide, associé à  $p_{IM}^* = 4$  MPa et  $q_s = 126$  kPa). Un calcul ISS spécifique conduit alors à un frottement négatif  $G_{sn}$  égal à 955 kN (au lieu de 620 kN obtenu avec le modèle utilisé pour évaluer les tassements), qu'il conviendra de considérer pour les vérifications structurales. En conclusion, avec l'approche proposée, comparativement à la pratique actuelle :

- la longueur de pieu retenue reste in fine similaire,
- des valeurs du frottements négatifs sensiblement plus importantes sont obtenues, mais qui interrogent dans une certaine mesure sur les méthodes actuelles de justification structurale.

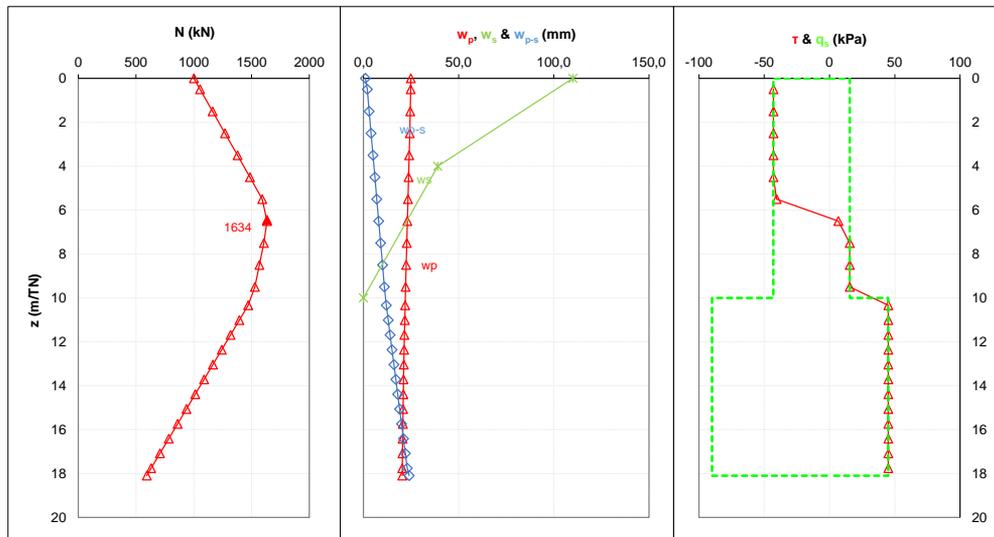


Figure 2. Résultats obtenus pour  $L = 18,1$  m

## 5. Conclusions

Cet article présente des réflexions sur la prise en compte des effets du phénomène de frottement négatif dans le cadre du dimensionnement des fondations profondes. L'évolution des problèmes à traiter, des moyens de modélisation et des documents de référence, conduit à proposer une évolution des approches pour modéliser et justifier les ouvrages soumis aux effets du phénomène de frottement négatif. Trois approches d'estimation des effets du frottement négatif et de complexité croissante sont ainsi proposées, complétées par une modulation des formalismes de vérification de portance, en mettant l'accent sur l'estimation des tassements. Ces méthodes permettent de couvrir de façon formalisée les incertitudes liées à l'estimation des paramètres et conduisent à des résultats similaires à la pratique existante. Elles peuvent être efficacement intégrées dans les travaux de révision en cours de la norme NF P94-262 relative à la justification des fondations profondes.

## 6. Références bibliographiques

- B Abchir, Z., Burlon, S., Frank, R., Habert, J., Legrand, S. (2016).  $t$ - $z$  curves for piles from pressuremeter test results. *Géotechnique* 66, pp. 137–148. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.097>
- AFNOR (2012). NF P94-262 : Norme d'Application Nationale de l'Eurocode 7 relative à la justification des fondations profondes
- Alonso, E.E., Josa, A., Ledesma, A. (1984). Negative skin friction on piles: a simplified analysis and prediction procedure. *Géotechnique* 34, pp. 341–357. <https://doi.org/10.1680/geot.1984.34.3.341>
- Burlon, S., Frank, R., Baguelin, F., Habert, J., Legrand, S. (2014). Model factor for the bearing capacity of piles from pressuremeter test results – Eurocode 7 approach. *Géotechnique* 64, pp. 513–525. <https://doi.org/10.1680/geot.13.P.061>
- Combarieu, O. (1985). Frottements négatifs sur les pieux (No. 136), Rapports de recherche du LCPC
- Combarieu, O. (1974). Effet d'accrochage et méthode d'évaluation du frottement négatif. BLPC, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp. 93–107
- Fellenius, B.H. (1984). Negative skin friction and settlement of piles, in: ICPF2
- Frank, R., Zhao, S.R. (1982) Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. BLPC 119, pp. 17–24
- Habert, J., Landry, B., Burlon, S. (2014). Effets du frottement négatif appréhendés par une méthode au coefficient de réaction  $t$ - $z$ , JNGG2014