

Suite logicielle Foxta v4 : Dossier de validation du module **FondProf**

Etabli par F. Cuira

Révision A de Mars 2020

Table des matières

1. Organisation du document.....	3
2. Rappel des méthodes utilisées	4
2.1. Cadre général.....	5
2.2. Etats limites de portance.....	5
2.2.1. Charge limite Q_l	5
2.2.2. Charge de fluage.....	6
2.3. Classification des pieux	6
2.4. Géométrie.....	7
2.5. Calcul de q_p et q_s à partir des résultats PMT	7
2.5.1. Contrainte limite en pointe q_p	7
2.5.2. Frottement latéral unitaire limite q_s	8
2.6. Calcul de q_p et q_s à partir des résultats CPT.....	8
2.6.1. Contrainte limite en pointe q_p	8
2.6.2. Frottement latéral unitaire limite q_s	9
2.7. Capacité portante ELS/ELU.....	10
2.7.1. Formulation.....	10
2.7.2. Pieux travaillant en compression	10
2.7.3. Pieux travaillant en traction	11
3. Tests de validation.....	12
3.1. A partir de la méthode pressiométrique	13
3.2. A partir de la méthode CPT.....	16

1. Organisation du document

Le présent document présente l'ensemble des tests menés dans le cadre de la validation scientifique du programme FondProf v4.x. Ce programme fait partie des huit modules de la suite logicielle Foxta v4 développée et commercialisée par Terrasol.

Le module FondProf se base exclusivement sur la transcription informatique des méthodes de dimensionnement empiriques explicitées dans la norme NF P 94 262 qui constitue la norme d'application de l'Eurocode 7 pour fondations profondes.

Ainsi pour ce modèle particulier, la validation se base exclusivement sur des comparaisons analytiques sur tableurs Excel. La validité scientifique des méthodes utilisées est réputée être justifiée par leur caractère normatif.

Le présent document est organisé en deux parties :

- Un rappel des méthodes implémentées
- Des comparaisons avec des contre-calculs analytiques visant à contrôler la bonne implémentation « informatique » des méthodes utilisées.

Au total, 40 tests ont été réalisés regroupés en deux séries.

2. Rappel des méthodes utilisées

2.1. Cadre général

Le module Fondprof est un programme de calcul qui permet de prévoir la charge limite Q_l , ainsi que les charges maximales autorisées sous sollicitations ELU et ELS à partir des résultats d'essais pressiométriques ou pénétrométriques. Il est basé sur les concepts et formulations recommandés par les règlements aux états limites en vigueur en France (actuellement la norme NF P 94 262, qui remplace les dispositions du Fascicule 62-Titre V du CCTG et celles du DTU 13.2).

Au sens de la norme NF P 94 262, la procédure de calcul appliquée par Fondprof s'apparente à la procédure du « modèle de terrain ».

2.2. Etats limites de portance

2.2.1. Charge limite Q_l

Considérons un pieu dont la base est située à la profondeur D dans un sol homogène (figure ci-dessous). Ce pieu, dont on néglige le poids, est chargé axialement en tête par une charge Q . Au moment de la rupture, la charge Q_l est équilibrée par les réactions limites du sol suivantes :

- Résistance unitaire du sol sous la pointe q_p , conduisant à la charge limite de pointe : $Q_p = q_p.A$ avec A section droite de la pointe ;
- Résistance q_{sl} due au frottement du sol sur la surface latérale du pieu ; si q_s est le frottement latéral unitaire limite, la charge limite par frottement latéral est : $Q_s = q_s.P.D$ avec P périmètre de forage du pieu.

Et l'on a : $Q_l = Q_p + Q_s$

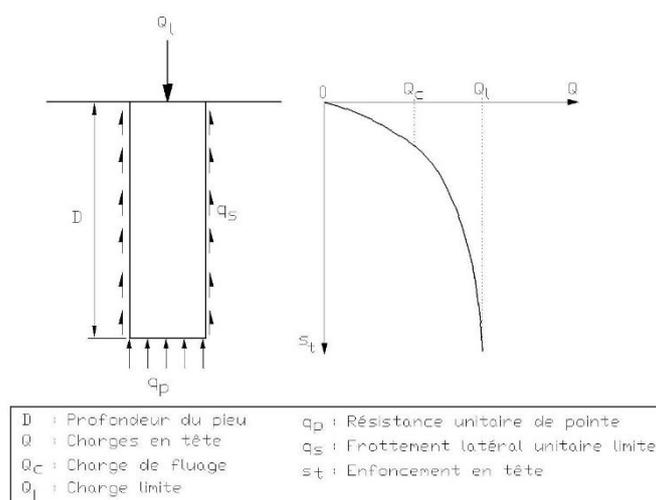


Figure 1 : Courbe de chargement axial du pieu

2.2.2. Charge de fluage

La courbe représentant la charge appliquée au pieu en fonction de l'enfoncement présente une partie sensiblement linéaire se limitant à une charge Q_c appelée charge de fluage. Pour les charges supérieures à Q_c , l'enfoncement du pieu ne se stabilise plus dans le temps, à charge constante.

De nombreux essais de chargement de pieux en vraie grandeur effectués par les laboratoires des Ponts et Chaussées ont permis d'établir des corrélations entre la charge de fluage Q_c et les charges limites de pointe Q_p et de frottement latéral Q_s . Ces corrélations sont différentes suivant le mode de mise en place du pieu dans le sol. Il est retenu les relations suivantes :

- pour les pieux mis en œuvre avec refoulement du sol : $Q_c = 0,7Q_s + 0,7Q_p$
- pour les pieux mis en œuvre sans refoulement du sol : $Q_c = 0,7Q_s + 0,5Q_p$

Les méthodes de dimensionnement données aux paragraphes suivants visent à déterminer la charge limite Q_l . La charge de fluage Q_c en sera déduite par ces formules empiriques, sauf dans le cas de l'essai de chargement statique, où elle pourra être évaluée directement.

2.3. Classification des pieux

Le tableau suivant présente la classification des pieux appliquée par Fondprof conformément à la norme NF P 94 262. Au total, les pieux sont classés selon 8 classes et 20 catégories.

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre		Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	Abréviation FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton - mortier - coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	
	12	Battu acier fermé	BAF	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN 12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

Tableau 1 : Classification des pieux (Annexe A – NF P 94-262)

2.4. Géométrie

Le pieu est caractérisé géométriquement à l'aide des paramètres suivants :

- Section en pointe notée « A » ;
- Périmètre du fût noté « P ».

On désigne par B le diamètre du pieu en pointe. Dans le cas d'une section non circulaire, la valeur de B se déduit de la section A à l'aide de la relation :

$$B = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

2.5. Calcul de q_p et q_s à partir des résultats PMT

2.5.1. Contrainte limite en pointe q_p

La contrainte limite en pointe d'un pieu isolé s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$q_p = k_p \cdot p_{le}^*$$

- La pression limite équivalente en pointe p_{le}^* s'obtient par la relation :

$$p_{le}^* = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} p_l^*(z) dz \quad \text{avec} \quad \begin{cases} a = \max\left(\frac{B}{2}, 0,5m\right) \\ b = \min(h, a) \end{cases}$$

Où « h » désigne la profondeur d'ancrage du pieu dans la couche porteuse.

- Le facteur de portance pressiométrique k_p s'exprime à l'aide de la relation :

$$k_p = \min\left(1 + (k_{p\max} - 1) \frac{D_{ef}}{5B}, k_{p\max}\right) \quad \text{avec} \quad D_{ef} = \frac{1}{p_{le}^*} \int_{D-10B}^D p_l^*(z) dz$$

D_{ef} est appelée profondeur d'encastrement équivalente. Les valeurs de $k_p = k_{p\max}$ pour

$D_{ef} > 5B$ sont précisées dans la figure suivante. Il est à noter que ces valeurs incluent déjà les coefficients réducteurs ρ_p usuellement appliqués pour des profilés ouverts.

Les valeurs de $k_{p\max}$ sont explicitées dans l'annexe F dans la norme NF P 94 262.

2.5.2. Frottement latéral unitaire limite q_s

Le frottement latéral limite q_s mobilisable dans une couche donnée s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$q_s = \text{Min}(q_s^{\max}; \alpha_{\text{pieu-sol}} \cdot f_{\text{sol}})$$

- q_s^{\max} désigne le frottement maximal pouvant être mobilisé pour un type de sol et une catégorie de pieu donnés. Notons que ces valeurs incluent déjà les coefficients réducteurs ρ_s usuellement appliqués pour des profilés ouverts.
- $\alpha_{\text{pieu-sol}}$ est un paramètre adimensionnel qui dépend à la fois du type du pieu et du type de sol.
- f_{sol} est fonction de la résistance intrinsèque du sol représentée ici par la pression limite. La valeur de f_{sol} s'obtient par corrélation avec la pression limite.

Les valeurs de q_s^{\max} , $\alpha_{\text{pieu-sol}}$ et f_{sol} sont explicités dans l'annexe F de la norme NF P 94-262.

2.6. Calcul de q_p et q_s à partir des résultats CPT

2.6.1. Contrainte limite en pointe q_p

La contrainte limite en pointe d'un pieu isolé s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$q_c = k_c \cdot q_{ce}$$

- La résistance en pointe équivalente q_{ce} s'obtient (après lissage) à l'aide de la relation:

$$q_{ce} = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) dz \quad \text{avec} \quad \begin{cases} a = \max\left(\frac{B}{2}, 0,5m\right) \\ b = \min(h, a) \end{cases}$$

Où « h » désigne la profondeur d'ancrage du pieu dans la couche porteuse.

- Le facteur de portance pénétrométrique k_c s'exprime à l'aide de la relation :

$$k_c = \min\left(k_{c\min} + (k_{c\max} - k_{c\min}) \frac{D_{ef}}{5B}, k_{c\max}\right) \quad \text{avec} \quad D_{ef} = \frac{1}{q_{ce}} \int_{D-10B}^D q_c(z) dz$$

D_{ef} est appelée profondeur d'encastrement équivalente. Le facteur de portance pour un encastrement nul $k_c = k_{c\min}$ est pris égal à :

- ✓ 0,30 pour un sol argileux ;
- ✓ 0,20 pour un sol intermédiaire ;
- ✓ 0,10 pour un sable et grave ;
- ✓ 0,15 pour une craie, une marne ou une roche altérée.

Les valeurs de $k_c = k_{c\max}$ pour $D_{ef} > 5 B$ sont précisées dans la figure suivante. Il est à noter que ces valeurs incluent les coefficients réducteurs ρ_p usuellement appliqués pour des profilés ouverts.

Les valeurs de $k_{c\max}$ sont explicitées dans l'annexe G dans la norme NF P 94 262.

2.6.2. Frottement latéral unitaire limite q_s

Le frottement latéral limite q_s mobilisable dans une couche donnée s'exprime à l'aide de la relation suivante :

$$q_s = \text{Min}(q_s^{\max}; \alpha_{\text{pieu-sol}} \cdot f_{\text{sol}})$$

- q_s^{\max} désigne le frottement maximal pouvant être mobilisé pour un type de sol et une catégorie de pieu donnés. Notons que ces valeurs incluent déjà les coefficients réducteurs ρ_s usuellement appliqués pour des profilés ouverts.
- $\alpha_{\text{pieu-sol}}$ est un paramètre adimensionnel qui dépend à la fois du type de pieu et du type de sol.
- f_{sol} est fonction de la résistance intrinsèque du sol représentée ici par la pression limite. La valeur de f_{sol} s'obtient par corrélation avec q_c .

Les valeurs de q_s^{\max} , $\alpha_{\text{pieu-sol}}$ et f_{sol} sont explicités dans l'annexe G de la norme NF P 94-262.

2.7. Capacité portante ELS/ELU

2.7.1. Formulation

La valeur de calcul de la capacité portante d'un pieu isolé à l'ELS ou à l'ELU (vis-à-vis des états limites de mobilisation de la résistance du sol) est estimée à l'aide de relation suivante :

$$Q_d = \frac{1}{F_{qs}} P \cdot \int_0^D q_s(z) dz + \frac{1}{F_{qp}} A \cdot q_p$$

Où :

- ✓ F_{qs} : facteur de sécurité « combiné » appliqué sur le frottement latéral limite ;
- ✓ F_{qp} : facteur de sécurité « combiné » appliqué sur la contrainte limite en pointe.

Les valeurs de F_{qs} et F_{qp} sont obtenues en combinant plusieurs coefficients partiels :

$$F_{qs} = (\gamma_{Rd1} \times \gamma_{Rd2} \times \gamma_s) / \beta_1 \quad F_{qp} = (\gamma_{Rd1} \times \gamma_{Rd2} \times \gamma_b) / \beta_2$$

- ✓ Les coefficients partiels de modèle γ_{Rd1} et γ_{Rd2} dépendent à la fois de la catégorie du pieu et de la méthode de calcul considérée (pressiométrique ou pénétrométrique) ;
- ✓ Les coefficients partiels de résistance γ_b (pointe) et γ_s (frottement) dépendent du mode de chargement (compression/traction) et de la combinaison d'actions (ELS permanentes ou caractéristiques, ELU fondamentales ou accidentelles) considérée
- ✓ Les paramètres de corrélation (pour la charge de fluage) β_1 et β_2 sont pris égaux à :
 - ✓ $\beta_1 = \beta_2 = 1,0$ à l'ELU ;
 - ✓ $\beta_1 = \beta_2 = 0,7$ à l'ELS pour des pieux refoulant le sol ;
 - ✓ $\beta_1 = 0,7$ et $\beta_2 = 0,5$ à l'ELS pour des pieux ne refoulant pas le sol.

2.7.2. Pieux travaillant en compression

Les valeurs de F_{qs} et F_{qp} pour un pieu travaillant en compression sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (PMT = pressiométrique, CPT = pénétrométrique).

	Catégorie	Méthode	Ancrage dans la craie	ELS QP	ELS CARAC	ELU FOND	ELU ACC
Facteur de sécurité combiné sur Qs	1 à 9, 11 à 14 et 16	PMT	NON	1.99	1.63	1.39	1.26
			OUI	2.42	1.98	1.69	1.54
		CPT	NON	2.04	1.67	1.43	1.30
			OUI	2.51	2.05	1.75	1.59
	10, 15 et 17 à 20	--	--	3.46	2.82	2.42	2.20
	Facteur de sécurité combiné sur Qp	1 à 6	PMT	NON	2.79	2.28	1.39
OUI				3.39	2.77	1.69	1.54
CPT			NON	2.86	2.34	1.43	1.30
			OUI	3.51	2.87	1.75	1.59
7 à 9, 11 à 14 et 16		PMT	NON	1.99	1.63	1.39	1.26
			OUI	2.42	1.98	1.69	1.54
		CPT	NON	2.04	1.67	1.43	1.30
			OUI	2.51	2.05	1.75	1.59
10 et 15		--	--	3.46	2.82	2.42	2.20
17 à 20		--	--	--	--	--	--

Tableau 2 : Valeurs de F_{qs} et F_{qp} pour un pieu travaillant en compression

2.7.3. Pieux travaillant en traction

Les valeurs de F_{qs} et F_{qp} pour un pieu travaillant en traction sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (PMT = pressiométrique, CPT = pénétrométrique).

	Catégorie	Méthode	Ancrage dans la craie	ELS QP	ELS CARAC	ELU FOND	ELU ACC
Facteur de sécurité combiné sur Qs	1 à 9, 11 à 14 et 16	PMT	NON	3.30	2.42	1.77	1.62
			OUI	4.00	2.94	2.15	1.96
		CPT	NON	3.41	2.51	1.83	1.68
			OUI	4.13	3.02	2.21	2.02
	10, 15 et 17 à 20	--	--	4.72	3.46	2.53	2.31

Tableau 3 : Valeurs de F_{qs} et F_{qp} pour un pieu travaillant en traction

3. Tests de validation

3.1. A partir de la méthode pressiométrique

Les tests réalisés dans cette section visent à vérifier l'exactitude des capacités portantes calculées par le module FondProf à partir des propriétés pressiométriques. Le contrôle est réalisé à l'aide d'un contre-calcul sous tableur Excel. 20 configurations sont testées correspondant chacune à une catégorie de pieu.

- FP-30101 Pieu de catégorie 1
- FP-30102 Pieu de catégorie 2
- FP-30103 Pieu de catégorie 3
- FP-30104 Pieu de catégorie 4
- FP-30105 Pieu de catégorie 5
- FP-30106 Pieu de catégorie 6
- FP-30107 Pieu de catégorie 7
- FP-30108 Pieu de catégorie 8
- FP-30109 Pieu de catégorie 9
- FP-30110 Pieu de catégorie 10
- FP-30111 Pieu de catégorie 11
- FP-30112 Pieu de catégorie 12
- FP-30112 Pieu de catégorie 13
- FP-30114 Pieu de catégorie 14
- FP-30115 Pieu de catégorie 15
- FP-30116 Pieu de catégorie 16
- FP-30117 Pieu de catégorie 17
- FP-30118 Pieu de catégorie 18
- FP-30119 Pieu de catégorie 19
- FP-30120 Pieu de catégorie 20

Pour chaque cas test, on évalue les courbes de capacité portante ELS/ELU sur toute la hauteur d'un pieu traversant une stratigraphie comportant autant de couches que de types de sols couverts par la méthode de dimensionnement. On compare ensuite l'écart maximal (point par point) entre les courbes calculées par le programme et celles obtenues par contre-calcul sous Excel. L'ensemble des fichiers de modélisation sont joints en annexe du dossier (Série 301xx). Les tableaux suivants présentent la comparaison des résultats obtenus.

Test	Fondprof v4.x	Contre calcul sous Excel	Ecart relatif (%)
FP-30101	5 778	5 778	<1%
FP-30102	6 183	6 183	<1%
FP-30103	3 661	3 662	<1%
FP-30104	5 801	5 800	<1%
FP-30105	4 407	4 407	<1%
FP-30106	7 591	7 591	<1%
FP-30107	8 029	8 029	<1%
FP-30108	4 741	4 742	<1%
FP-30109	6 481	6 481	<1%
FP-30110	5 230	5 230	<1%
FP-30111	6 887	6 888	<1%
FP-30112	5 385	5 385	<1%
FP-30113	4 110	4 110	<1%
FP-30114	4 551	4 551	<1%
FP-30115	6 260	6 260	<1%
FP-30116	3 963	3 963	<1%
FP-30117	1 599	1 599	<1%
FP-30118	938	938	<1%
FP-30119	1 706	1 706	<1%
FP-30120	2 192	2 192	<1%

Tableau 4 : Résultats des tests de validation 301xxx – Capacités ELS CARA

Test	Fondprof v4.x	Contre calcul sous Excel	Ecart relatif (%)
FP-30101	7 926	7 926	<1%
FP-30102	8 447	8 448	<1%
FP-30103	5 204	5 204	<1%
FP-30104	7 957	7 957	<1%
FP-30105	6 163	6 164	<1%
FP-30106	10 446	10 446	<1%
FP-30107	10 327	10 327	<1%
FP-30108	6 098	7 000	<1%
FP-30109	8 336	8 336	<1%
FP-30110	6 722	6 722	<1%
FP-30111	8 858	8 859	<1%
FP-30112	6 926	6 926	<1%
FP-30113	5 286	5 286	<1%
FP-30114	5 853	5 853	<1%
FP-30115	8 046	8 046	<1%
FP-30116	5 097	5 098	<1%
FP-30117	2 105	2 105	<1%
FP-30118	1 255	1 255	<1%
FP-30119	2 193	2 193	<1%
FP-30120	2 817	2 817	<1%

Tableau 5 : Résultats des tests de validation 301xxx – Capacités ELU ACC

La figure suivante illustre la comparaison des courbes de portance issues de Fondprof et celles calculées analytiquement sous Excel.

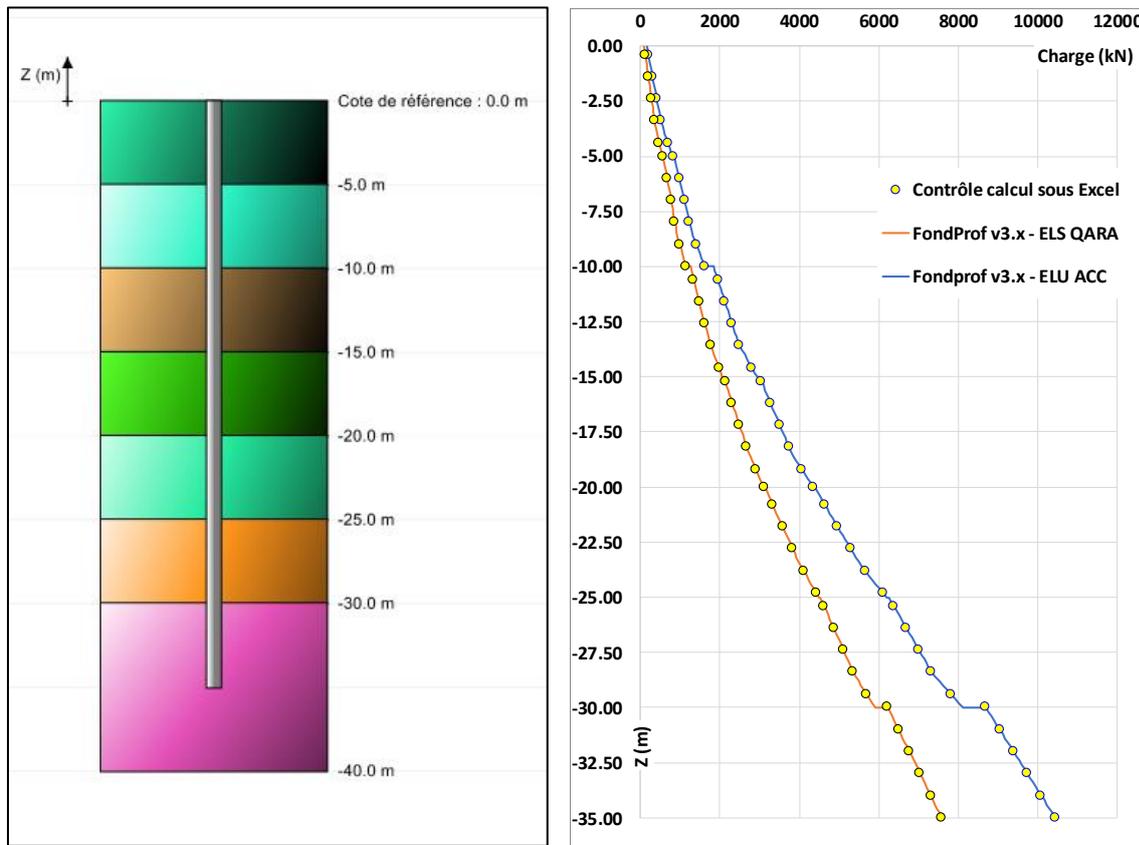


Figure 2 : Cas test FP-30106 – Comparaison des courbes de portance

3.2. A partir de la méthode CPT

Les tests réalisés dans cette section visent à vérifier l'exactitude des capacités à l'arrachement calculées par le module FondProf à partir des propriétés pénétrométriques. Le contrôle est réalisé à l'aide d'un contre-calcul sous tableur Excel. 20 configurations sont testées correspondant chacune à une catégorie de pieu.

- FP-30201 Pieu de catégorie 1
- FP-30202 Pieu de catégorie 2
- FP-30203 Pieu de catégorie 3
- FP-30204 Pieu de catégorie 4
- FP-30205 Pieu de catégorie 5
- FP-30206 Pieu de catégorie 6
- FP-30207 Pieu de catégorie 7
- FP-30208 Pieu de catégorie 8
- FP-30209 Pieu de catégorie 9
- FP-30210 Pieu de catégorie 10
- FP-30211 Pieu de catégorie 11
- FP-30212 Pieu de catégorie 12
- FP-30212 Pieu de catégorie 13
- FP-30214 Pieu de catégorie 14
- FP-30215 Pieu de catégorie 15
- FP-30216 Pieu de catégorie 16
- FP-30217 Pieu de catégorie 17
- FP-30218 Pieu de catégorie 18
- FP-30219 Pieu de catégorie 19
- FP-30220 Pieu de catégorie 20

Pour chaque cas test, on évalue les courbes de capacité portante ELS/ELU sur toute la hauteur d'un pieu traversant une stratigraphie comportant autant de couches que de types de sols couverts par la méthode de dimensionnement. On compare ensuite l'écart maximal (point par point) entre les courbes calculées par le programme et celles obtenues par contre-calcul sous Excel. L'ensemble des fichiers de modélisation sont joints en annexe du dossier (Série 302xx). Les tableaux suivants présentent la comparaison des résultats obtenus.

Test	Fondprof v4.x	Contre calcul sous Excel	Ecart relatif (%)
FP-30201	2 074	2 074	<1%
FP-30202	2 447	2 448	<1%
FP-30203	1 482	1 482	<1%
FP-30204	2 457	2 457	<1%
FP-30205	1 750	1 751	<1%
FP-30206	1 809	1 810	<1%
FP-30207	4 116	4 116	<1%
FP-30208	2 255	2 255	<1%
FP-30209	2 816	2 816	<1%
FP-30210	2 295	2 295	<1%
FP-30211	2 887	2 887	<1%
FP-30212	2 488	2 489	<1%
FP-30213	2 214	2 215	<1%
FP-30214	2 589	2 590	<1%
FP-30215	2 862	2 863	<1%
FP-30216	1 890	1 890	<1%
FP-30217	255	255	<1%
FP-30218	490	490	<1%
FP-30219	1 126	1 126	<1%
FP-30220	1 416	1 416	<1%

Tableau 6 : Résultats des tests de validation 312xxx – Capacités ELS QP

Test	Fondprof v4.x	Contre calcul sous Excel	Ecart relatif (%)
FP-30201	3 325	3 325	<1%
FP-30202	3 858	3 858	<1%
FP-30203	2 479	2 479	<1%
FP-30204	3 871	3 871	<1%
FP-30205	2 863	2 863	<1%
FP-30206	4 306	4 307	<1%
FP-30207	6 468	6 468	<1%
FP-30208	3 221	3 221	<1%
FP-30209	4 425	4 425	<1%
FP-30210	3 280	3 280	<1%
FP-30211	4 124	4 125	<1%
FP-30212	3 555	3 555	<1%
FP-30213	3 163	3 164	<1%
FP-30214	3 699	3 699	<1%
FP-30215	4 091	4 091	<1%
FP-30216	2 700	2 700	<1%
FP-30217	384	385	<1%
FP-30218	731	731	<1%
FP-30219	1 609	1 610	<1%
FP-30220	2 023	2 023	<1%

Tableau 7 : Résultats des tests de validation 302xxx – Capacités ELU FOND

La figure suivante illustre la comparaison des courbes de portance issues de Fondprof et celles calculées analytiquement sous Excel.

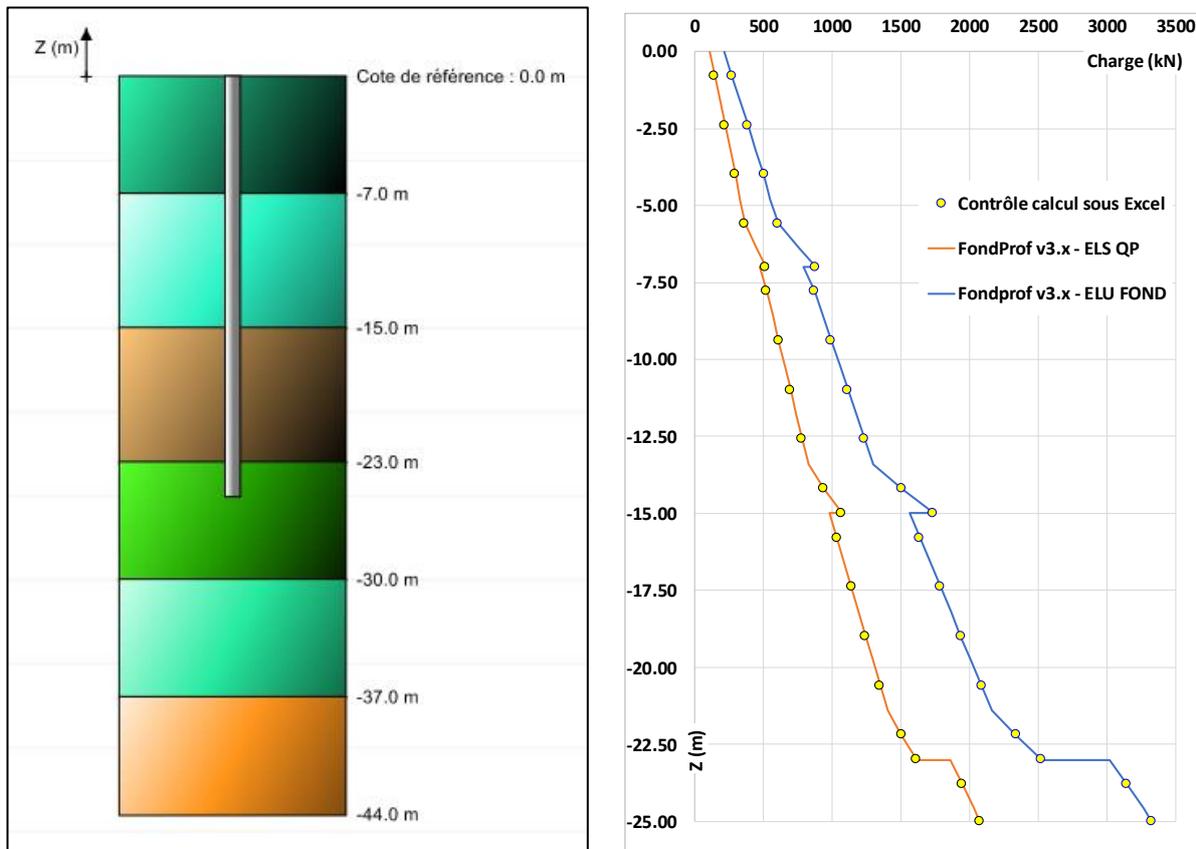


Figure 3 : Cas test FP-30201 – Comparaison des courbes de portance