

Grands chantiers à l'international

Fondations de la Tour F à Abidjan

Gabriel BALDI FROES (Terrasol)
Ramzy ORABI (Spie batignolles fondations)

JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU 11 JUIN 2024

Sommaire

1. Présentation du projet
2. Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations
3. Interaction sol-structures et modèle de calcul
4. Déroulé des travaux

1. Présentation du projet

Présentation du projet

Contexte général & Enjeu

- Abidjan, centre économique de la Côte d'Ivoire, abrite le cœur administratif du pays dans la zone du Plateau
- Projet de redynamisation de l'administration :
 - Réhabilitation des tours A à E existantes
 - Construction de la nouvelle Tour administrative F, la plus haute de la région (près de 400m)

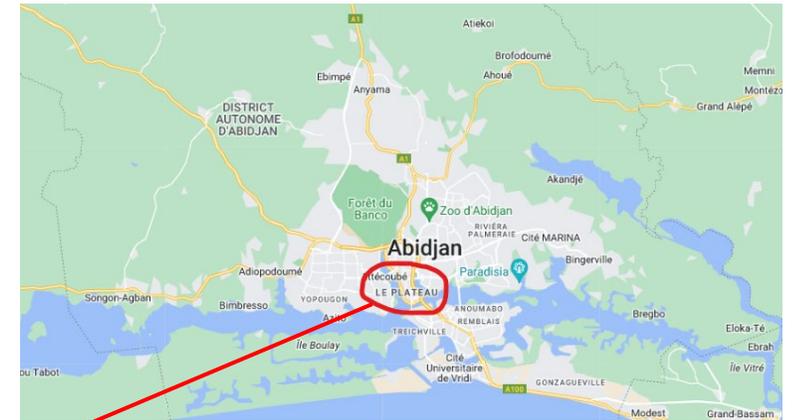


Fig. 1 : Quartier du Plateau d'Abidjan



Fig. 3 : Tour F d'Abidjan

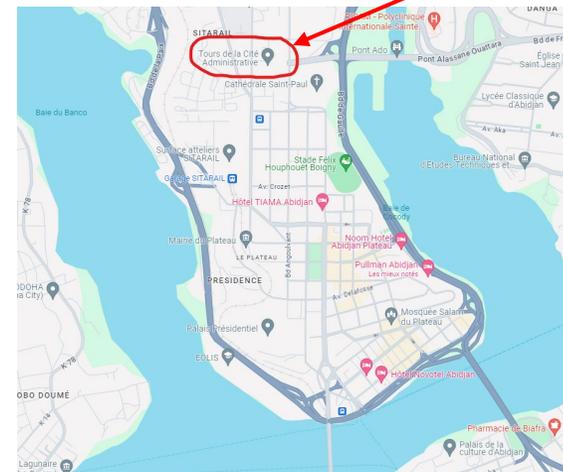


Fig. 2 : Localisation du projet

Présentation du projet

Intervenants

- Maître d'Ouvrage : ministère de la Construction et de l'Urbanisme de Côte d'Ivoire
- Assistant au Maître d'Ouvrage : Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement
- Contractant général : PFO Africa
- Maître d'œuvre : Pierre Fakhoury
- BET Structure : A. Verdier
- Entreprise lot Gros Œuvre : Besix (Bureau d'études Greisch)
- Entreprise lot Fondations : Spie batignolles fondations (Bureau d'études interne & Terrasol)
- Expert technique - interprétation des essais et dimensionnement des fondations : M. Bustamante

Présentation du projet

Contexte géotechnique

3 campagnes de reconnaissances entre 2016 et 2018 :

- 2 sondages carottés de 35 m
 - 1 sondage destructif de 120 m
 - 13 sondages pressiométriques de 30 m à 90 m de profondeur
- Sable rougeâtre et jaunâtre peu argileux en tête
- Sables fins à moyens en profondeur : $p_l^* = 4$ MPa
- Présence de lentilles argileuses (métriques)

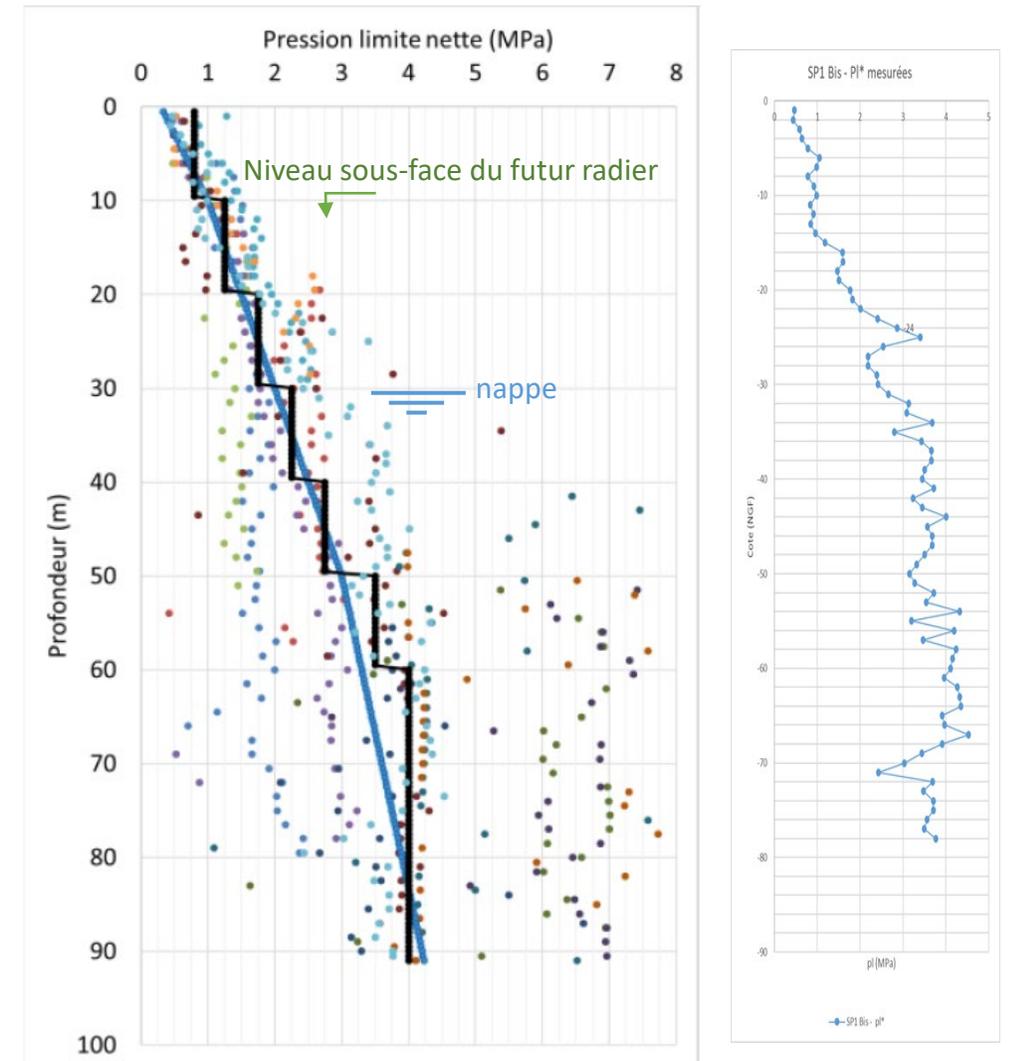


Fig. 4 : Profil de sol du projet de la Tour F

Présentation du projet

Principe du système de fondations

Données d'entrée :

- Paramètres géotechniques
- Poids total de la tour = 170 000t
- Radier général d'épaisseur 3,5m
- Emprise au sol réduite : 37m x 32m

→ 1) Principe préliminaire basé sur un équilibre entre nombre et longueur des fondations :

- 70 barrettes de 1,52 m x 2,80m
- Base injectée : amélioration du facteur de pointe k_p
- Effet de groupe

→ 2) Phase de dimensionnement précis sur la base de l'essai préalable sur les fondations + étude en soufflerie (effets du vent)

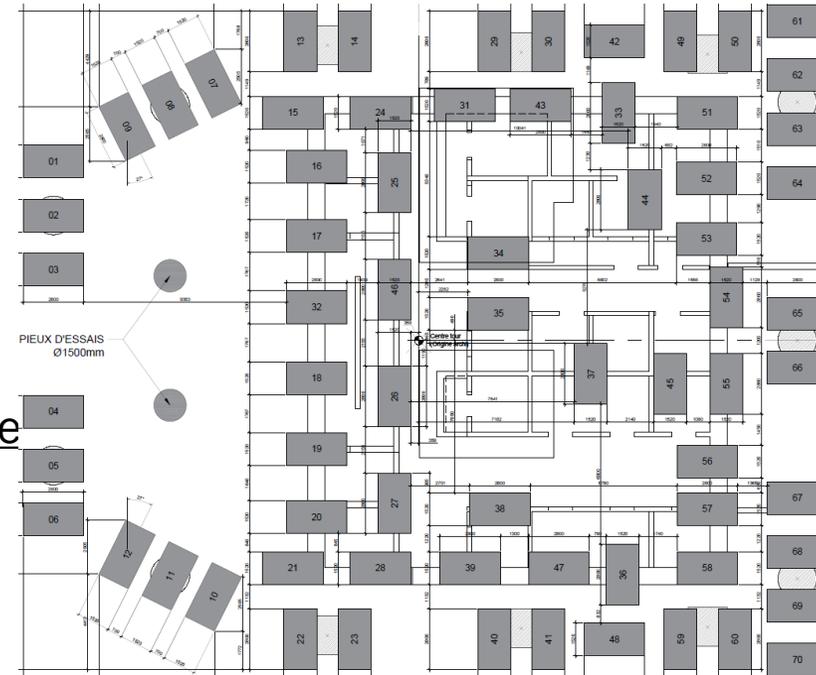


Fig. 5 : Implantation des barrettes de fondations de la Tour F

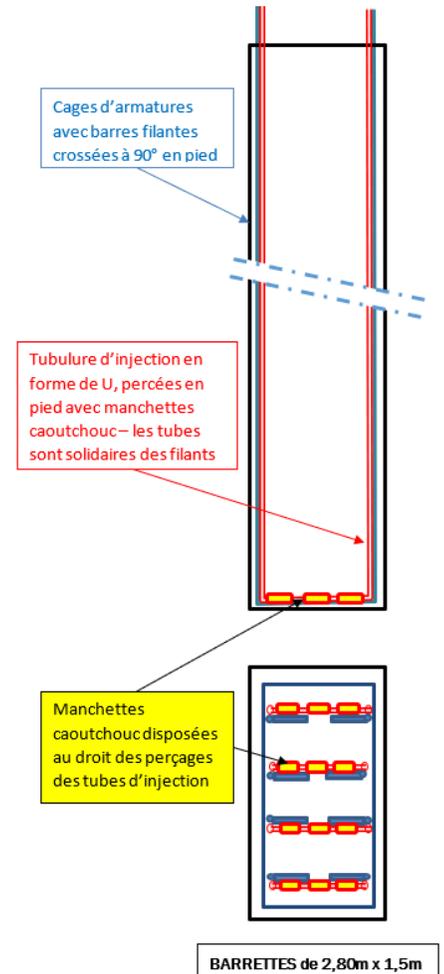


Fig. 6 : Dispositif d'injection de pointe des barrettes

2. Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations

Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations

Objectif de l'essai

- Problème posé :
 - Réduction du frottement pour des fondations profondes (NF P94-262 – Annexe F – Note (6) du §F.5.2)
 - $K_p = 1,1$ en l'absence d'injection de pointe→ En l'absence de toute amélioration, certaines barrettes auraient atteint **120m** de profondeur !

(6) Pour les fondations profondes de grande longueur visées au tableau F.5.2.1 (signe ##), avec les sols correspondants, on appliquera un abattement de 50 % sur la valeur de frottement déduite de l'application des différents tableaux et figures sur les sections de pieu situées à 25 m ou plus au-dessus de la pointe.

Tableau F.5.2.3 — Valeurs maximales de frottement axial unitaire limite q_s

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Valeurs en kPa					Roche altérée ou fragmentée
			Argile % CaCO ₃ < 30 % Limon	Sols intermédiaires	Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire-Marneux	
1	FS ##	Foré simple (pieux et barrettes)	90	90	90	200	170	200
2	FB ##	Foré boue (pieux et barrettes)	90	90	90	200	170	200

Fig. 7 : Extrait de la norme NF P94-262 – réduction des frottements pour les barrettes > 25m

- Objectifs de l'essai :
 - Valider un coefficient de pointe amélioré $k_p = 2,6$
 - Déterminer les frottements limites
 - Mesurer l'impact des injections de pointe sur les frottements en partie inférieure

Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations

Principe de l'essai – Cellule Osterberg

- Réalisation de 2 pieux d'essais $\Phi = 1,5\text{m}$ à 50m de profondeur
- Pieux testés à la cellule d'Osterberg (O-Cell[®]) :
 - 1 ou plusieurs vérins de forte capacité placés au sein de la fondation
 - On mobilise :
 - Du frottement en partie supérieure
 - Du frottement et la pointe en partie inférieure
 - On mesure directement, à l'aide piges :
 - La pointe
 - Les soulèvements de plaque d'appui
 - L'ouverture des vérins
 - On mesure, à l'aide de jauges de déformations : les déplacements le long du fût

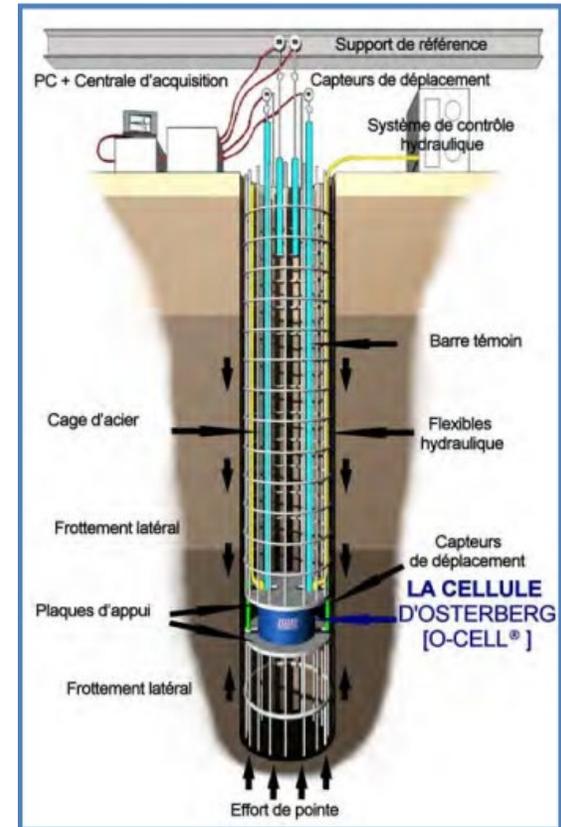


Fig. 8 : Schéma de principe de la cellule Osterberg

Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations

Principe de l'essai - Fugro

Pieu n°1

Rupture de la pointe : cellule à 3m de la pointe

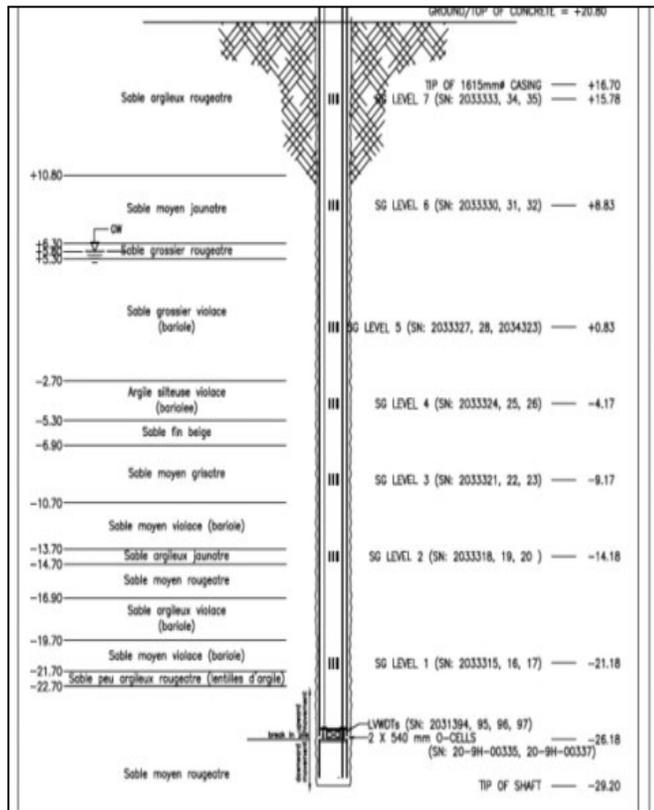


Fig. 9 : Configuration du 1^{er} pieu d'essai

Pieu n°2

Rupture du frottement en partie supérieure : cellule à 8m de la pointe

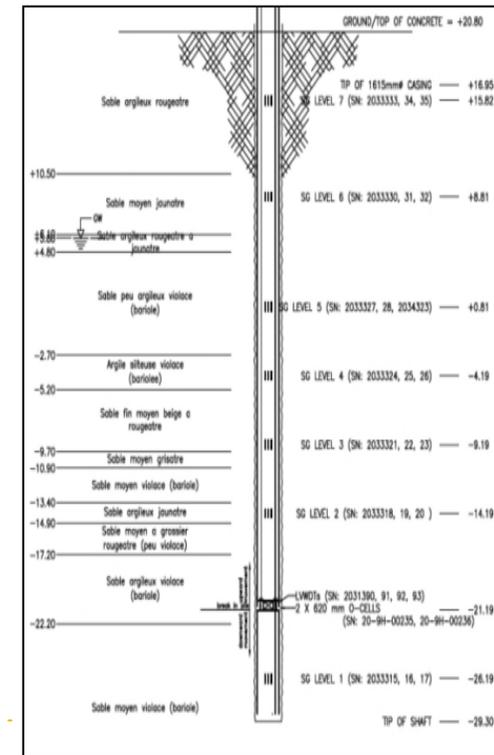


Fig. 10 : Configuration du 2^{ème} pieu d'essai

Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations

Réalisation des pieux d'essais

- Plateforme de travail à 10m de profondeur (1,5m au-dessus de la sous-face du futur radier)
- Montage des cages de pieux avec dispositif d'essai (cellules) et tubes métalliques pour injection
- Forage des pieux et mise en place des cages
- Injection de la pointe :
 - Ouverture des manchettes à l'eau : claquage 24h à 36h après le bétonnage
 - Injection d'un coulis garantissant la résistance du contact béton/sol
- 2 semaines de séchage des pieux avant l'essai



Fig. 11 : Plateforme de travail



Fig. 12 : Forage des pieux d'essai



Fig. 13 : Montage du dispositif d'essai et des tubes d'injection dans la cage d'armature du pieu d'essai

PE01 : 2 x Φ 540mm (charge max = 18,8MN)
PE02 : 2 x Φ 620mm (charge max = 28,0MN)



Fig. 14 : Mise en place de la cage d'armature

Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations

Essai PE01 : résultats et interprétation

- Charge maximale appliquée = 2080 t
- Tassement plaque inférieure < 38 mm
- Ouverture vérins < 51 mm
- Tassement pointe < 33 mm → pas de rupture ($1/10^{\text{ème}}$ D = 150mm selon §4.2 (4) de la norme NF P 94-262), ni amorce de fluage.
- Tassement de la pointe à partir d'un effort de 3930 kN → valeur de frottement sur les 3 derniers mètres : $q_s = 250$ kPa
- $PI^* = 4$ MPa → $3 < k_p < 3,6$, en considérant la rupture de pointe obtenue sous une charge égale à l'effort appliqué majoré de 20% à 40%



Fig. 15 : Système de contrôle d'essai sur PE01

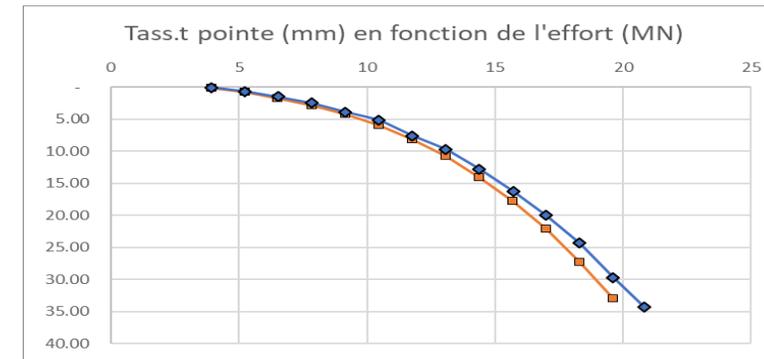


Fig. 16 : Courbe de tassement de la pointe - PE01

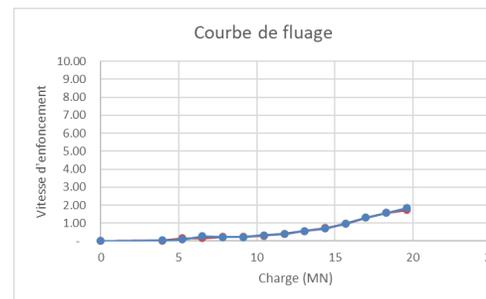


Fig. 17 : Courbe de fluage - PE01

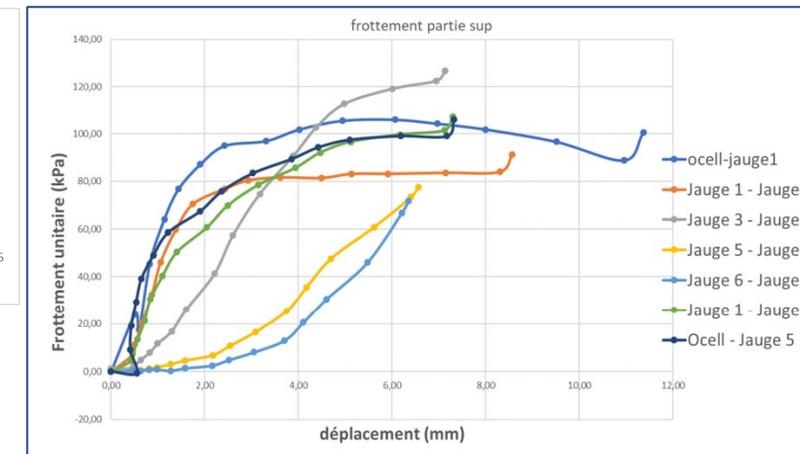


Fig. 18 : Déplacement des jauges le long du pieu - PE01

Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations

Essai PE02 : résultats et interprétation

- Charge maximale appliquée = 2030 t
- Effort mesuré à la rupture du frottement : 20MN (déduction faite du poids du pieu déjaugé) → frottement moyen de 100kPa sur les 42m supérieurs du pieu.
- Déplacement des jauges → estimation précise des valeurs de frottement limite entre 2 jauges successives
- Déplacement de la jauge située sous le vérin (3m au-dessus de la pointe) → valeur de frottement limite sur les 8 derniers mètres : $q_s = 350 \text{ kPa}$
- Pas de soulèvement franc de la tête de pieu



Fig. 19 : Rupture du frottement sur la partie supérieure

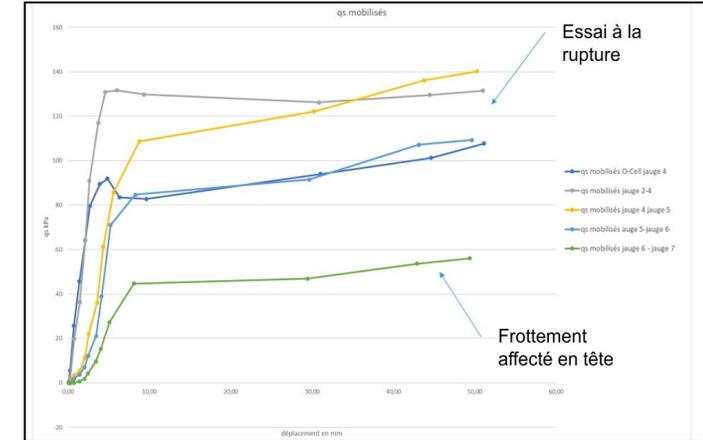


Fig. 20 : Déplacement des jauges le long du pieu - PE02

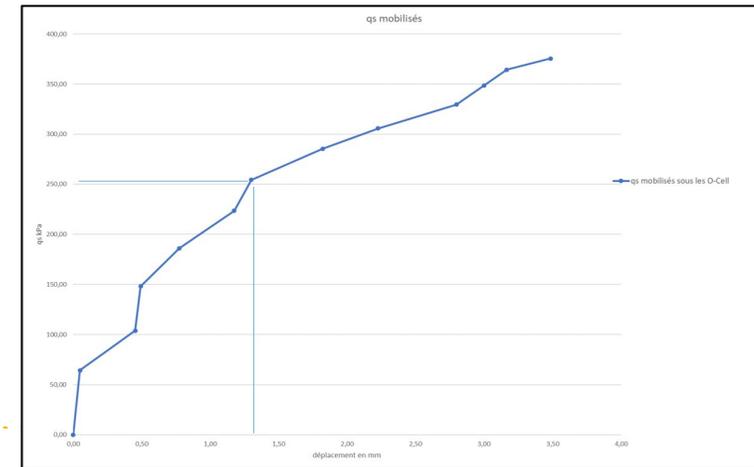


Fig. 21 : Détermination du q_s mobilisé sur les 5 derniers mètres - PE02

Essai préalable et validation des paramètres de dimensionnement des fondations

Valeurs retenues

Paramètres retenus pour le dimensionnement des barrettes :

- Pointe (1^{er} pieu) : k_p retenu = 3,0 > 2,6 (valeur visée avant essai)
- Validation des injections de pointe et de l'amélioration associée
- Frottements :
- Effet du ramonage en tête de pieux non avéré
- Amélioration des frottements en pied grâce à l'injection vérifiée : q_s retenu = 150kPa sur les 5m inférieurs (à titre conservatoire)

Interprétation des essais menée conjointement par : M. Bustamante, P. Berthelot / Fugro, Terrasol, Spie batignolles fondations

Conclusion : barrettes de profondeur 59m à 64m

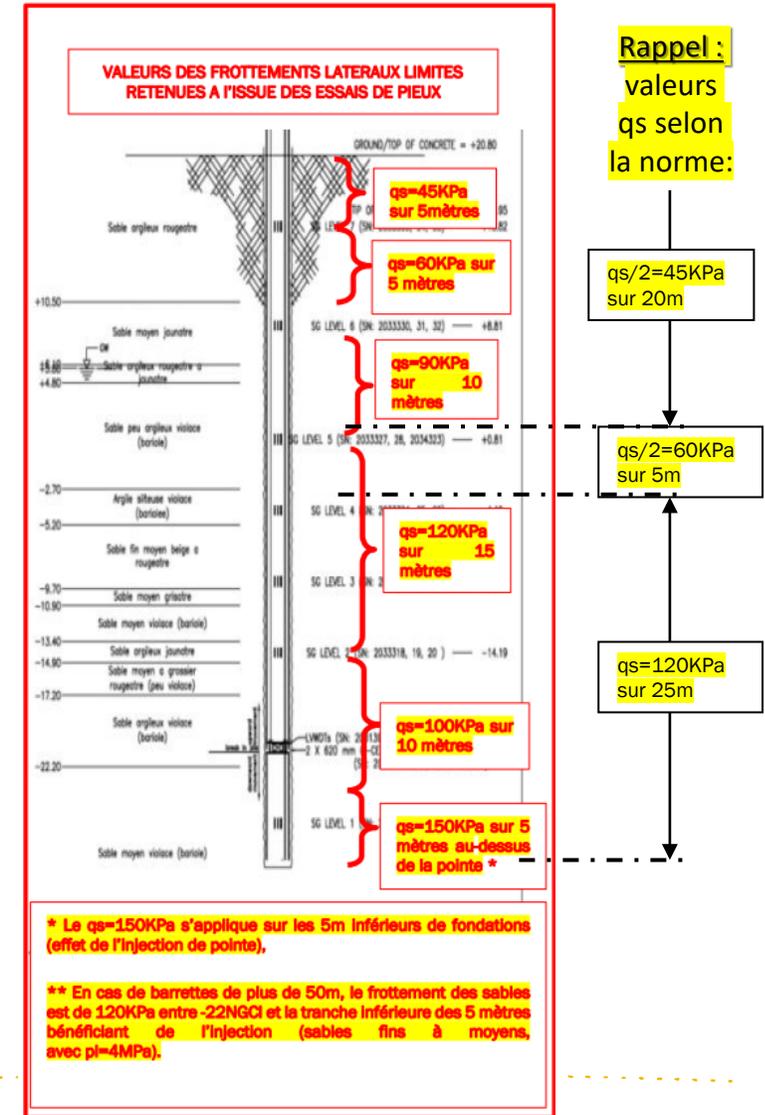
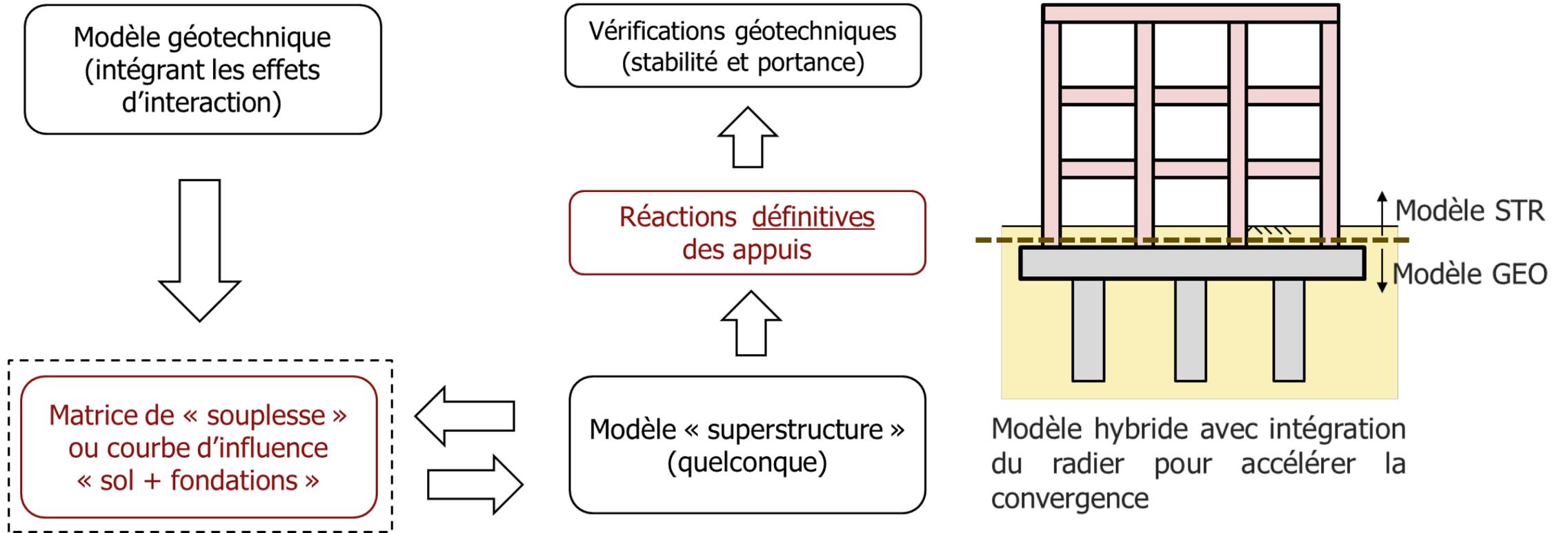


Fig. 22 : Valeurs de frottement retenues à l'issue des essais

3. Interaction sol-structures et modèle de calcul

Interaction sol-structures et modèle de calcul

Procédure de calcul

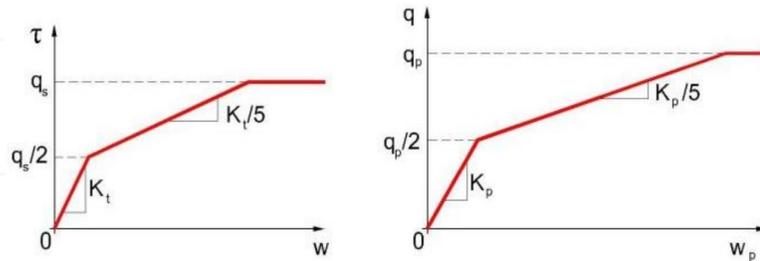
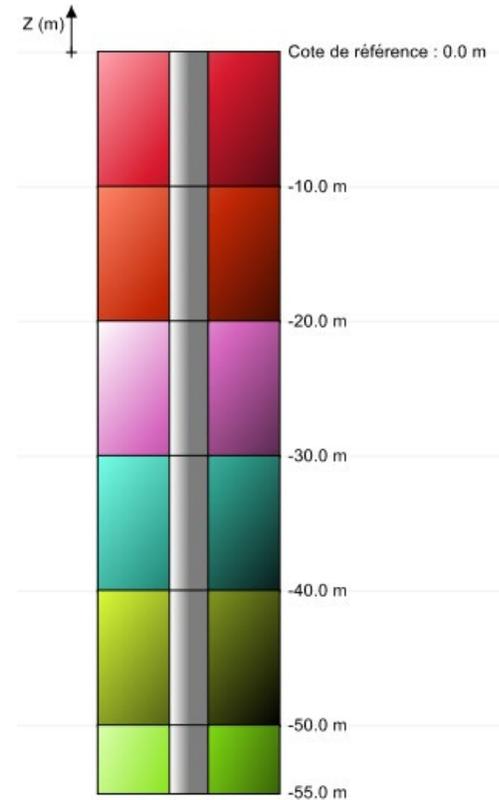


Interaction sol-structures et modèle de calcul

Evaluation des raideurs des barrettes

Etape 1

Raideurs unitaires
(lois « t-z »)

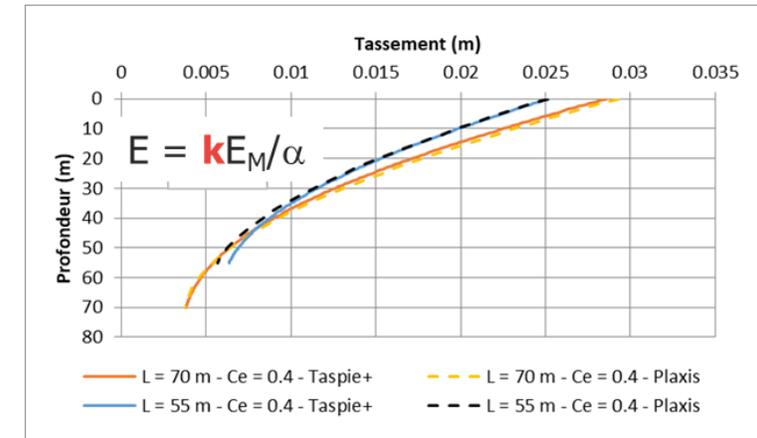
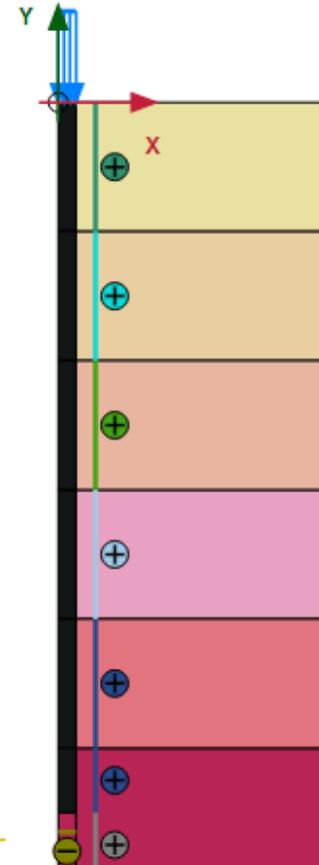


$$k_{isolé} = \frac{F_{ELS} QP}{S}$$

Raideurs validées par les essais
de chargement

Etape 2

Courbe d'influence
(MEF 2D)

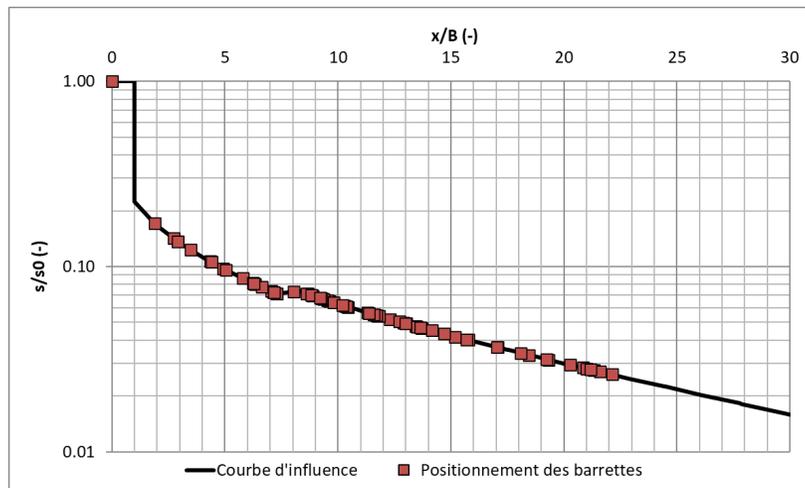
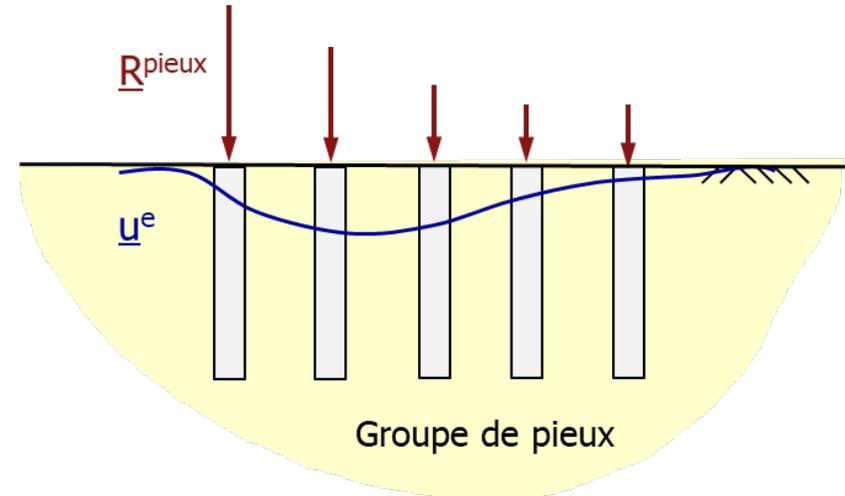
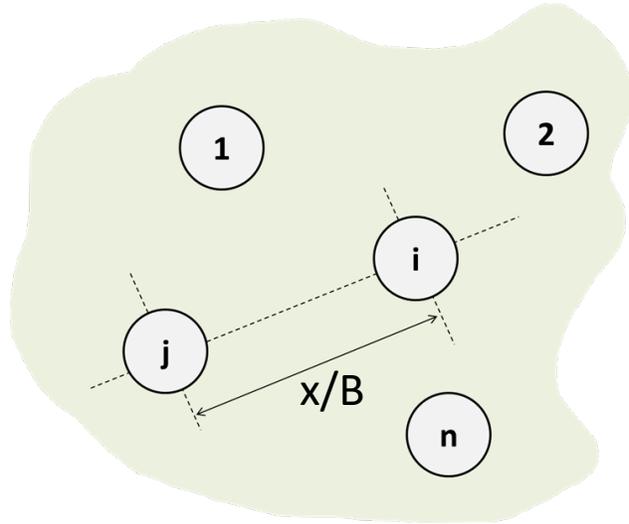


A l'interface : loi Mohr-Coulomb
 $c' = q_s$ et $\phi' = 0$

Interaction sol-structures et modèle de calcul

Evaluation des raideurs des barrettes

Courbe d'influence : raideurs avec prise en compte de l'effet de groupe



$$\alpha_{ii} = s_i/s_i = 1$$

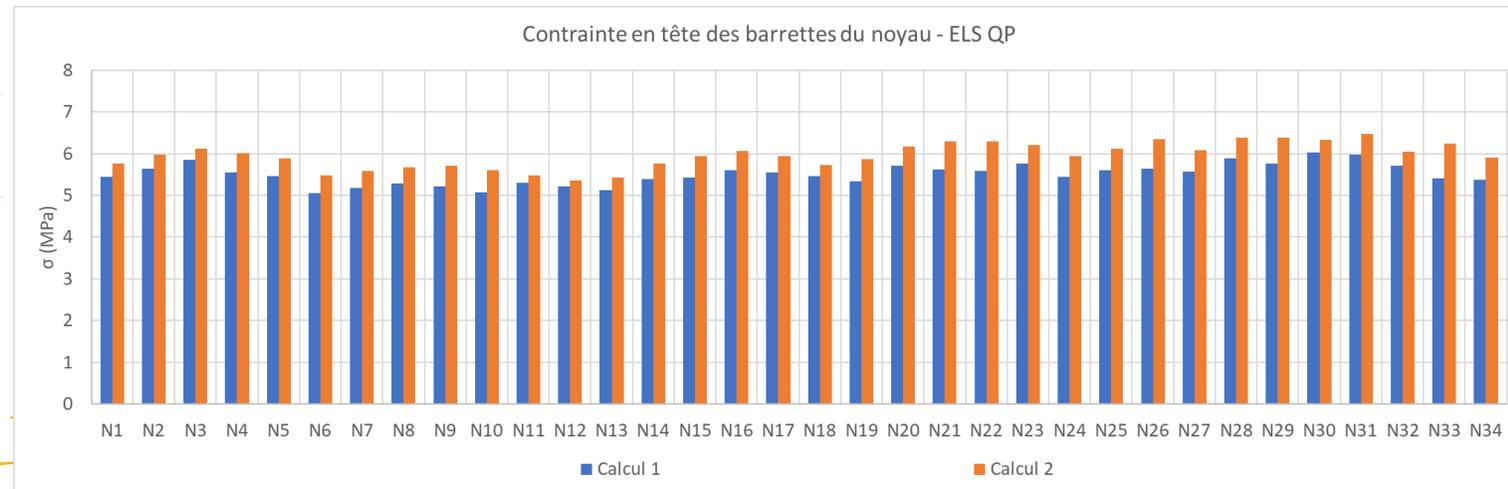
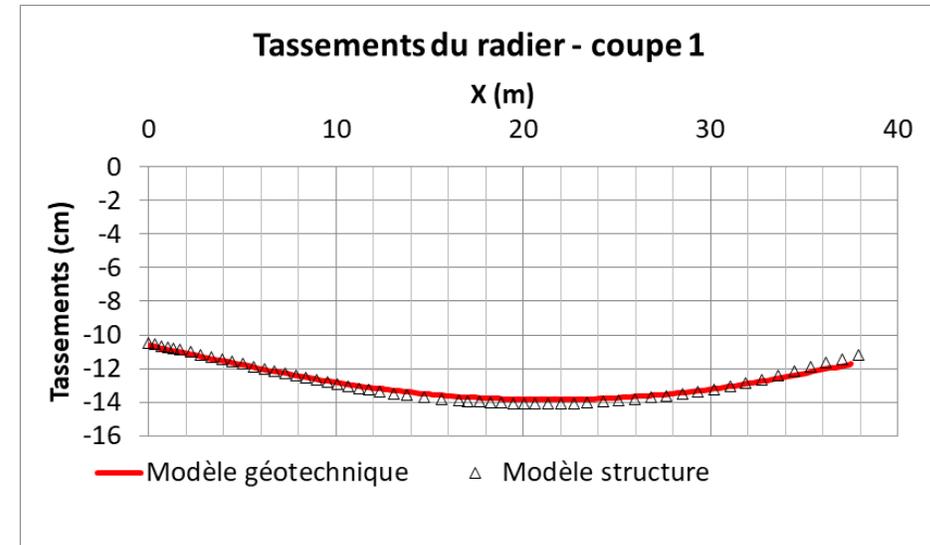
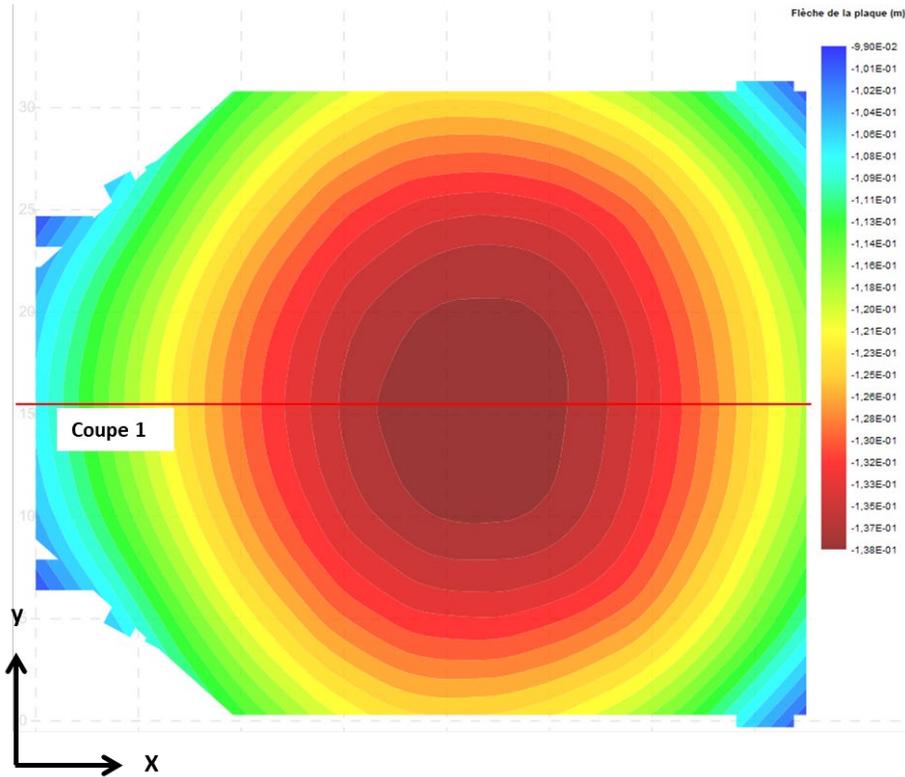
$$\alpha_{ji} = s_j/s_i \leq 1$$

$$K_i^{\text{groupe}} = \frac{K_i^{\text{isolé}}}{1 + \sum_{j \neq i} \alpha_{vj} \left(\frac{x}{B_{ij}} \right) \frac{R_j}{R_i}}$$

Raideurs « apparentes » (avec effet de groupe) au droit de chaque barrette à rentrer dans le modèle STR

Interaction sol-structures et modèle de calcul

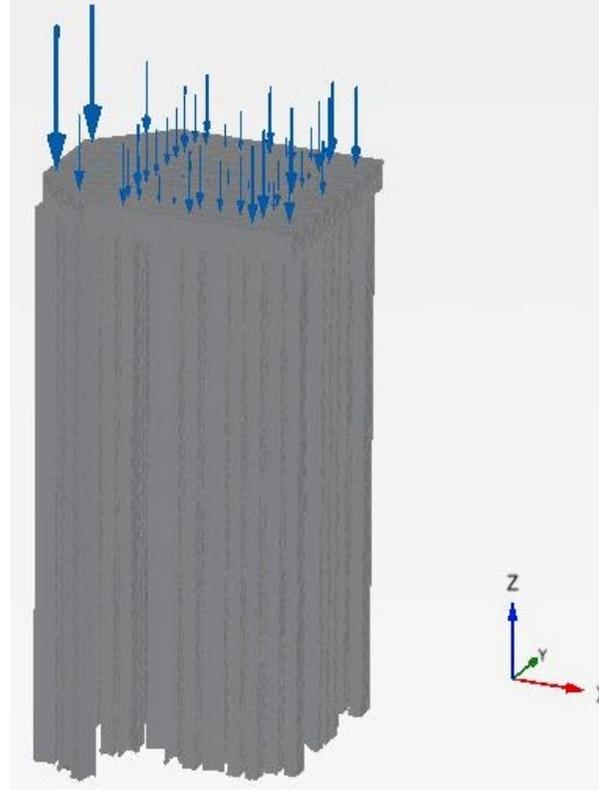
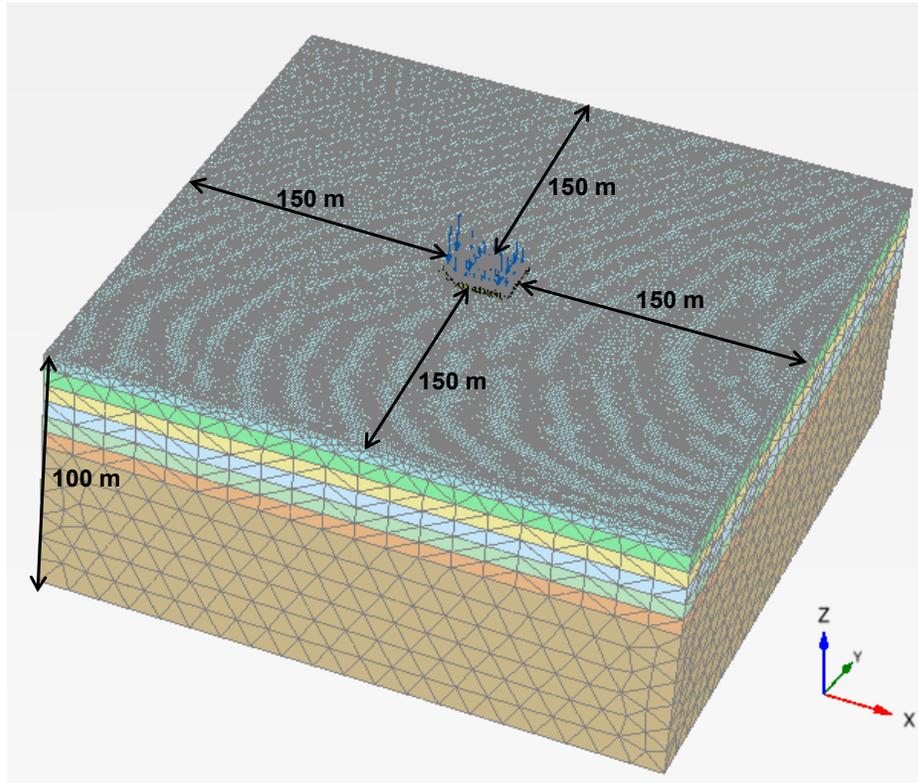
Résultats



Pour la tour F : calculs réalisés avec le logiciel Tasplaq

Interaction sol-structures et modèle de calcul

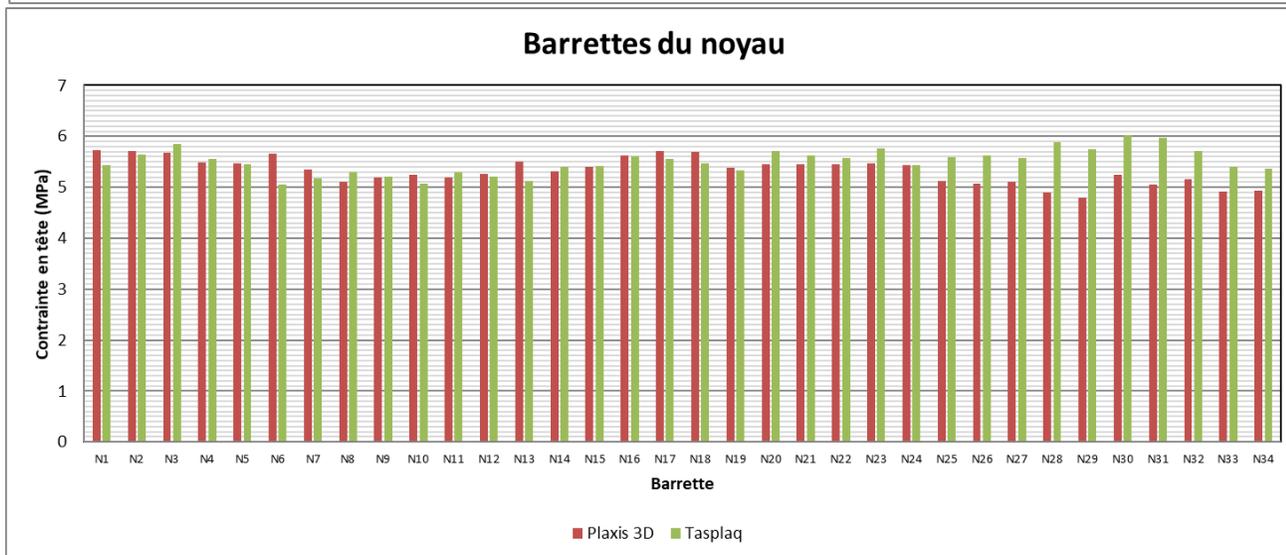
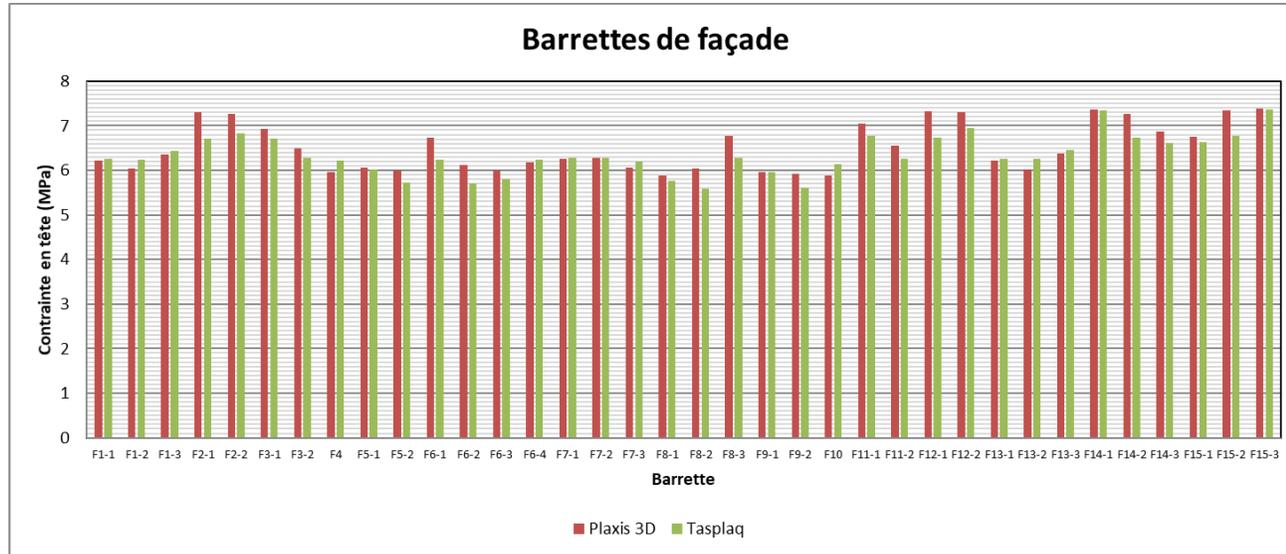
Modèle aux éléments finis 3D de contrôle



- Modèle Plaxis 3D (élastique linéaire) avec les barrettes représentées en éléments volumiques et des éléments d'interface pour gérer la mobilisation du frottement
- Modèle de contrôle uniquement après la convergence de la procédure d'ISS

Interaction sol-structures et modèle de calcul

Modèle aux éléments finis 3D de contrôle



- Résultats comparables entre le modèle 3D et le modèle hybride
- Efforts en tête des barrettes avec un écart moyen de 5%

4. Déroulé des travaux

Déroulé des travaux

Réalisation des barrettes

- 70 barrettes de 59m à 64m de profondeur (~18 000 m³) :
 - Benne à câbles Stein sur porteur HS885
 - Forage sous boue bentonitique
 - Grue de manutention SC1000
 - Injections via centrale Obermann VS 111
 - Terrassement post-barrettes : 5 000 m³
- Durée des travaux : 7 mois



Fig. 24 : Travaux de coffrage / ferrailage du radier par Besix

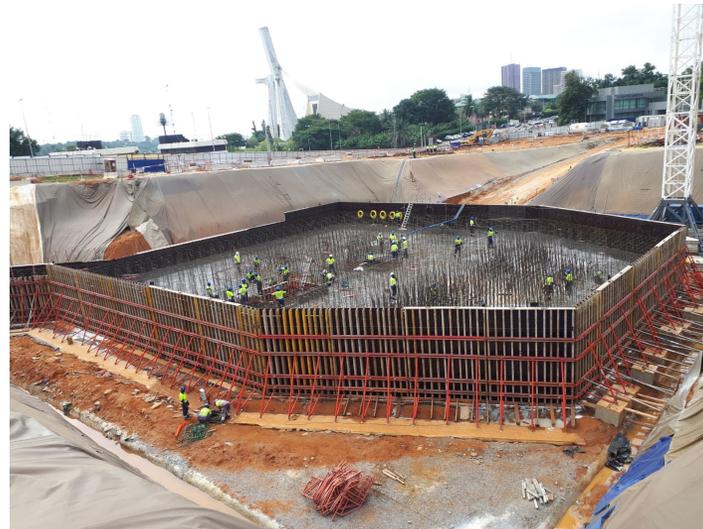


Fig. 23 : Réalisation des travaux de barrettes par Spie batignolles fondations

Déroulé des travaux

Etat actuel du projet

- Avancement actuel de la Tour :
 - Noyau : R+47
 - Dalles : R+43
 - > 50% de la charge totale devant être appliquée sur les barrettes
- Tassements actuellement mesurés $\sim 1,5\text{cm} < 4,5\text{cm} - 6\text{cm}$ prévus par le calcul



Fig. 25 : Photo à date de l'avancement des travaux sur la Tour F

Merci