

SOLSCOPE 2021

Changement climatique et géosciences: techniques

Réhabilitation lourde du pont Félix Houphouët
Boigny à Abidjan (Côte d'Ivoire)



Réhabilitation du pont Félix Houphouët Boigny



- Un peu d'histoire
 - Les motivations
 - Conception et construction du pont
- La genèse et la conception du renforcement
- L'établissement du projet d'Exécution
- Les évènements et adaptations en phase travaux
- Conclusion



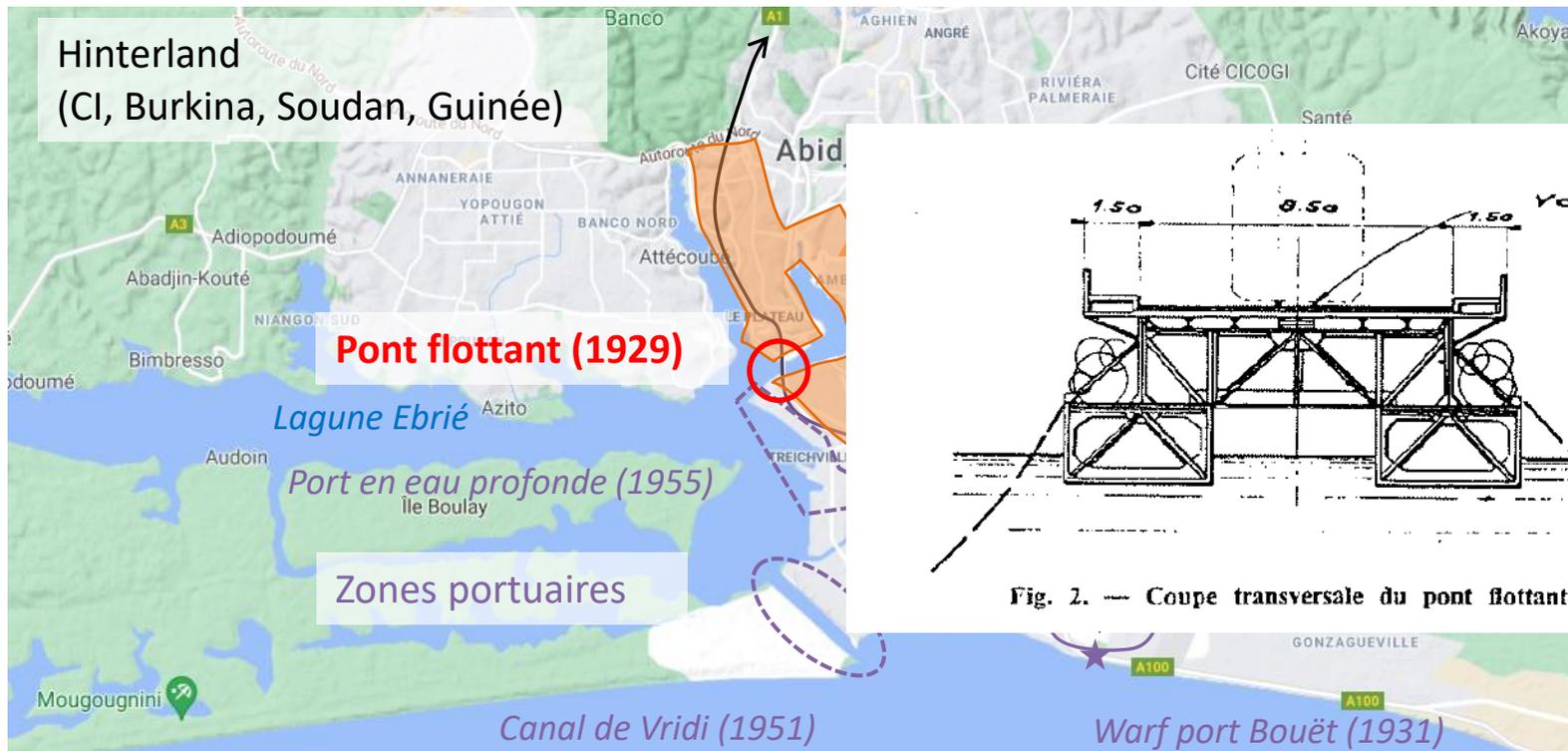
Réhabilitation du pont Félix Houphouët Boigny

Un peu d'histoire

Un peu d'histoire



Un pont d'une importance capitale (situation avant 1957)



Un peu d'histoire



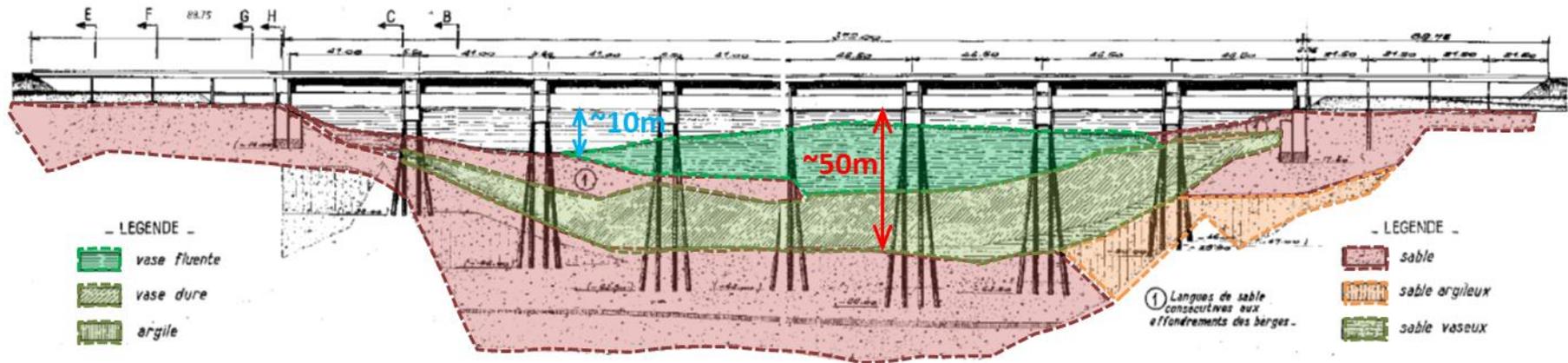
Une conception dictée par le programme fonctionnel et les contraintes techniques

Contraintes fonctionnelles (1951)

- Emplacement contraint par l'urbanisme existant (dont voies ferrées) et à venir,

Contraintes techniques

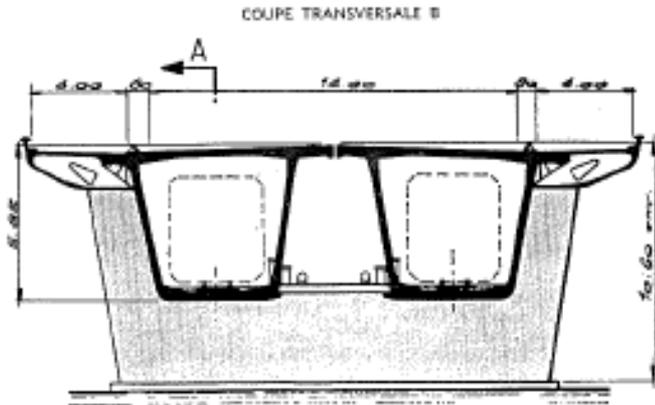
- Contexte géologique
- Corrosivité (sol, atmosphère, trains à vapeur)



Un peu d'histoire



Une conception dictée par le programme fonctionnel et les contraintes techniques

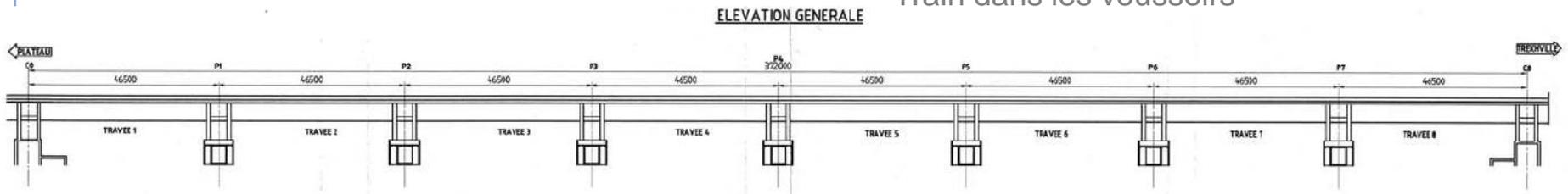


Contraintes techniques

- Contexte géologique
- Corrosivité (sol, atmosphère, trains à vapeur)

Choix de conception

- Ouvrage en béton (corrosion des CM)
- 8 travées isostatiques (46.5m)
- Train dans les voussoirs



Un peu d'histoire



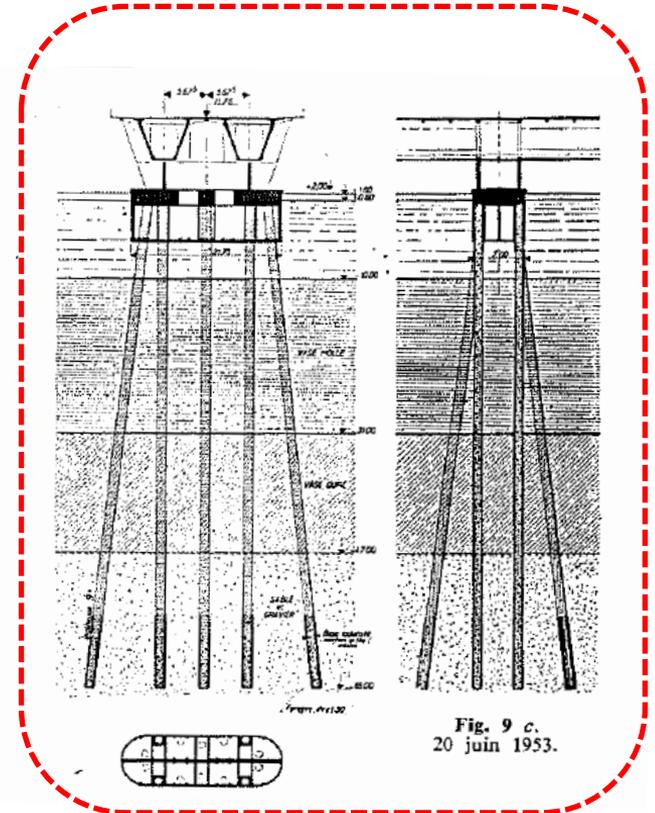
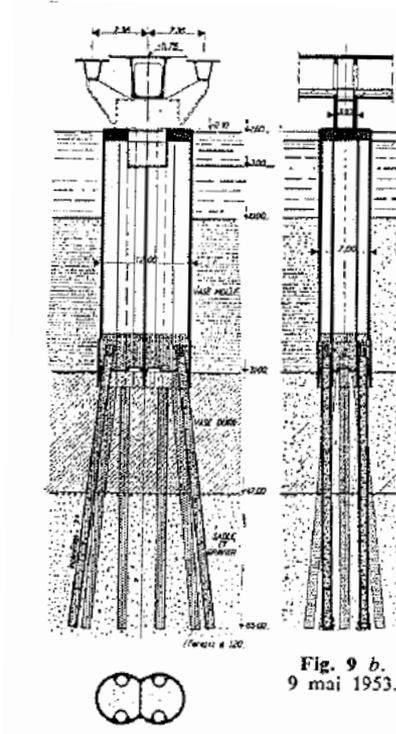
Fondations de l'ouvrage historique

Pile (problématiques)

- Fondations en lagune
- Profondeur de l'horizon d'ancrage (>50m)
- Epaisseur de tranche d'eau et de vases fluantes: reprise des efforts horizontaux

Solutions étudiées

- Caisson dans les vases + pieux forés
- Pieux forés dont pieux inclinés



Un peu d'histoire

Fondations de l'ouvrage historique

Piles solution retenue

- Pieux forés ancrés dans les sables compacts:
 - 4 pieux verticaux
 - 4 pieux inclinés à 15% (azimut de 45° par rapport à l'axe de l'ouvrage)
- Forage à la Benoto en 1.5m à l'abri d'un tubage louveré
- Caisson faisant office de gabarit

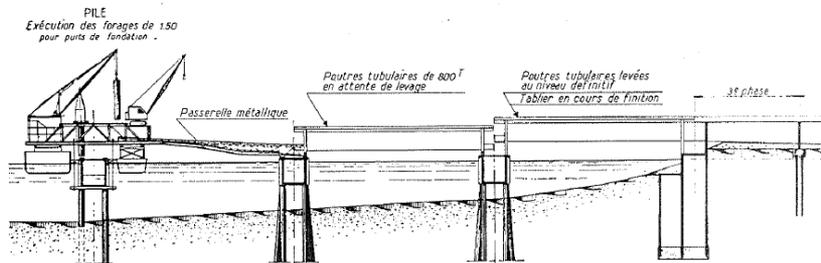
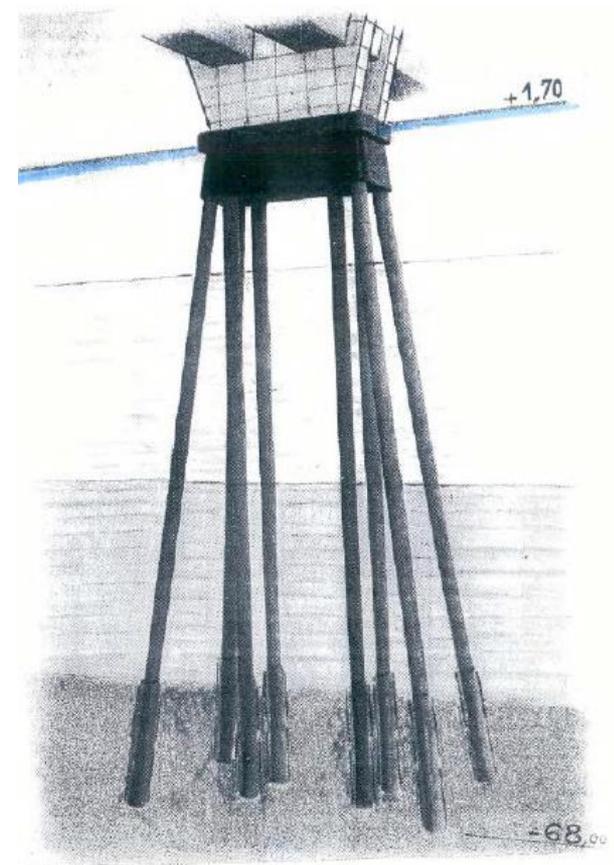


Fig. 36. — Installation flottante d'exécution des piles (phases d'exécution).



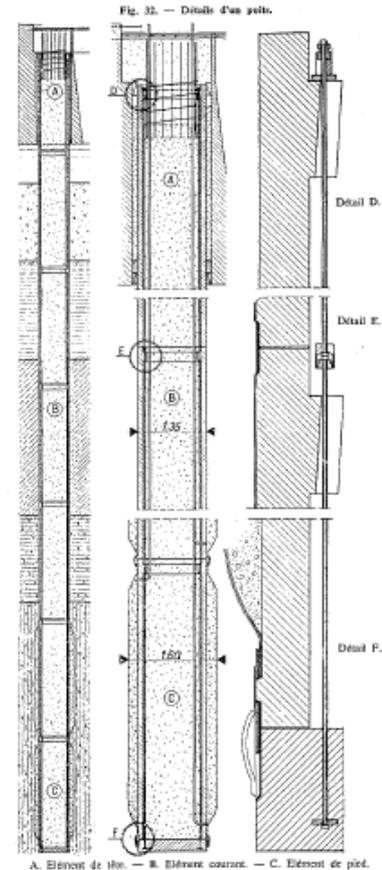
Perspective d'une pile et sa fondation (extrait rapport Collège experts 1998)

Un peu d'histoire

Fondations de l'ouvrage historique

Piles solution retenue

- Mise en œuvre structure des pieux préfabriquée
 - « gaines » BA : d_{ext} 1.35m, ep. 0.1m, Ht. 6m
 - Assemblées par précontrainte (32HA8) continue
- Bétonnage immergé
- Extraction des tubes de foration
- Injection de mortier en base sur la zone d'ancrage
 - Hauteur injectée 12m
 - Récupération de l'espace annulaire entre viroles et tubage (amélioration q_s)



Un peu d'histoire

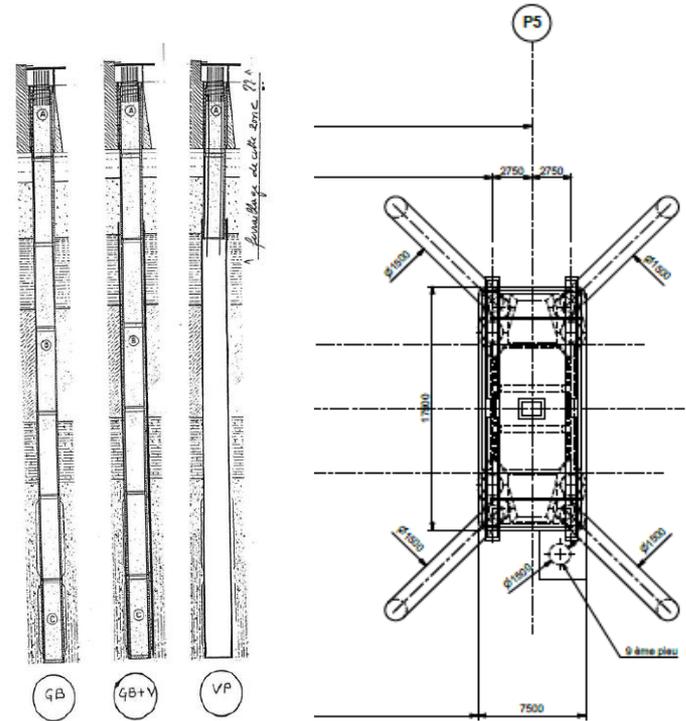


Fondations de l'ouvrage historique – adaptations Wx

Difficultés de retrait des tubes

- Adaptation des procédures de chantier conduisant à 3 familles sur l'ouvrage
 - Pieux (gaine béton GB) où les tubages ont pu être retirés
 - Pieux (GB+V) avec tubages partiellement retirés
 - Pieux (VP) avec partie inférieure coulée en place à l'abri du tubage métallique perdu

Ajout d'un pieu sur pile P5



Un peu d'histoire



Fondations de l'ouvrage historique

Culées: solution retenue suite effondrement des berges

- Caisson havés
- Ancrage dans les sables vers 16/17m de prof.
- Dimension 25x12m

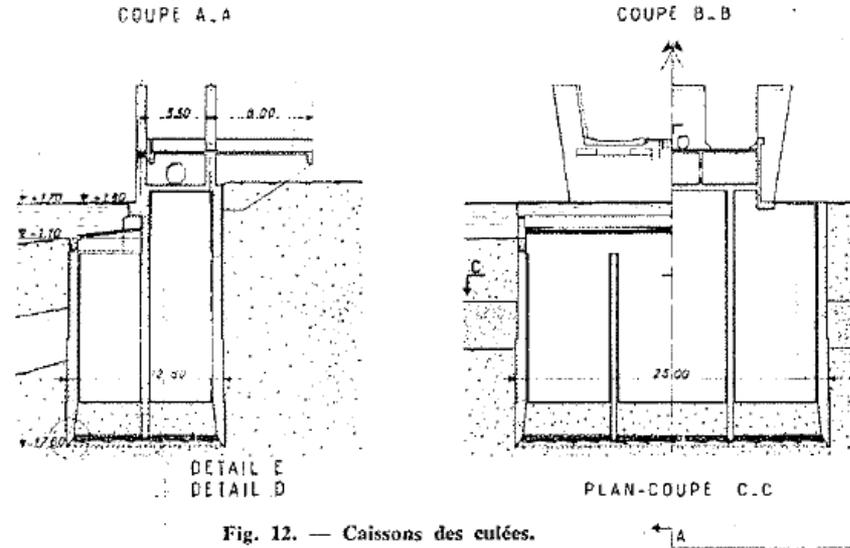


Fig. 12. — Caissons des culées.



Réhabilitation du pont Félix Houphouët Boigny

Conception du confortement

Evolution de l'ouvrage entre les années 50 et 2000

Etat structurel des pieux

- 1973/1974: fissuration des pieux en partie libre (généralisés P2 à P5) réparée par chemisage béton époxy
- Etat en 2002:
 - Réparation de 1974 en bon état
 - Désagrégation généralisée des joints entre gaines BA préfa:
 - Diminution section résistante (1.35m → 1.07m)
 - Attaque/rupture précontrainte?
- Fissuration horizontale des pieux

Etat « géotechnique » des pieux

- Impossibilité de quantifier la sécurité sur les pieux existants
- Néanmoins:
 - Mise en butée des tabliers sur caissons
 - Nivellement général: déplacement des appuis
- Signes de faiblesse des fondations existantes:
 - Défaut de portance localisés?
 - Reprise des efforts horizontaux?

Nécessité impérieuse de remplacer ou conforter cet ouvrage structurant du réseau d'Abidjan (seuls 3 ponts sur la lagune après mise en service du pont HKB en 2014)

Conception du renforcement



Programme de renforcement

Ouvrage principal

- **Renforcement des fondations des appuis en rivière par réalisation de nouveaux pieux.**
- Réparation des fûts de piles et des caissons de fondation.
- Renforcement du tablier.
- Réparation, renforcement et protection de l'intrados du hourdis supérieur du tablier.
- Renforcement du hourdis inférieur et de ses consoles d'about.
- Remplacement et réparation des équipements et superstructures.

Ouvrages d'accès

- Travaux de réparation des matériaux
- Equipement et superstructure

Contraintes programmatiques

- **Maintien de l'ouvrage en service**
- **Maintien de la navigabilité**

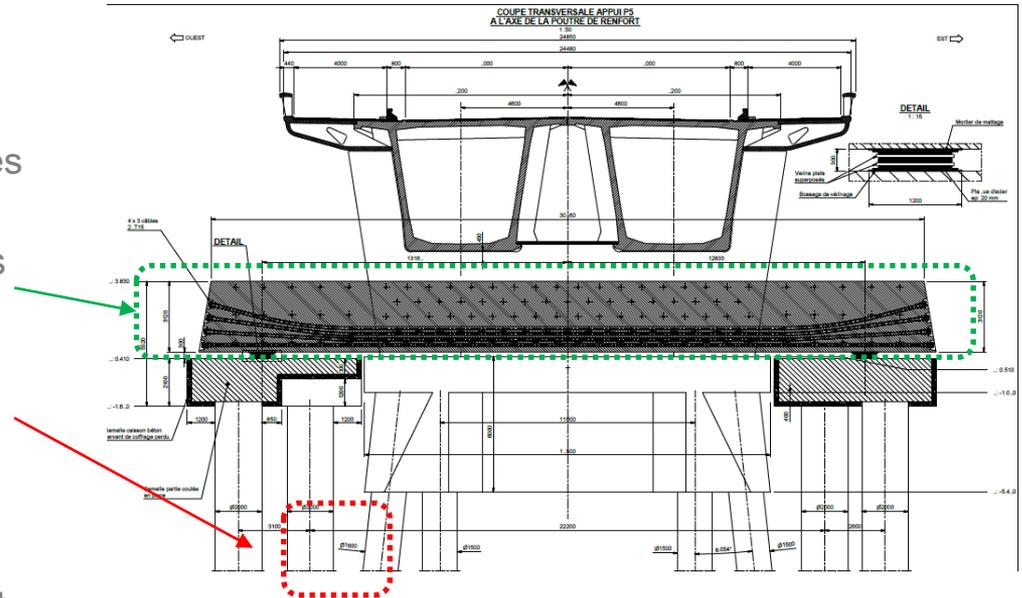
Conception du renforcement



Solution du concepteur (Egis-JMI:2015)

Nouveau système de fondations

- Reprenant 100% de la charge de l'ouvrage
- Positionnées dans l'axe longitudinal des caissons de fondation
 - Transfert des charges par poutres BP clouées aux piles
 - Proximité des nouveaux pieux avec pieux existants mais décalage difficile:
 - Coût structurel du rallongement des poutres
 - Futur pont du métro à l'ouest
- **Pointe des nouveaux pieux au dessus des anciens pieux**



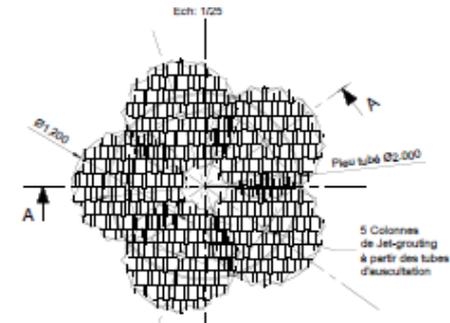
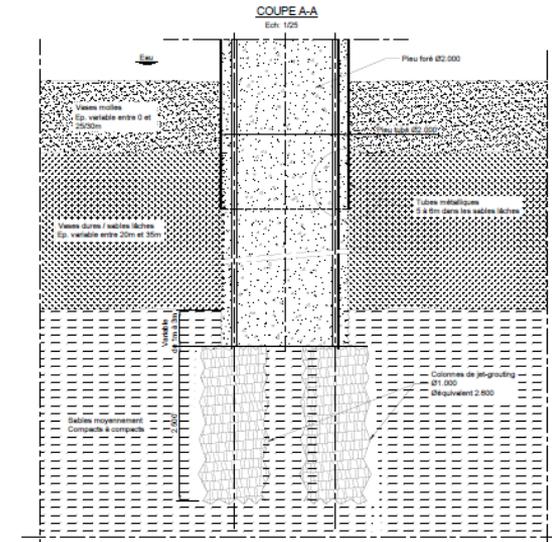
Conception du renforcement

Solution du concepteur (Egis-JMI:2015)



6 Pieux ϕ 2000 par semelle

- Pieux forés tubés dans les vases (tube perdu)
- Forés boue en deçà
- Renfort de la pointe par colonnes de Jet-Grouting
 - Augmentation de la surface de pointe (A_p)
 - Permet d'éviter que les sables d'ancrage soient décomprimés par le forage: augmentation k_p
- Hypothèses conception:
 - $A_p: 3.14 \rightarrow 5.3\text{m}^2$ $k_p: 1.1 \rightarrow 3.7$
 - $R_b = k_p A_p p_{le}^* : 3.45 p_{le}^* \rightarrow 19.6 p_{le}^*$



Essais de pieux requis pour valider les hypothèses de résistance de pointe



Réhabilitation du pont Félix Houphouët Boigny

Etablissement du projet d'EXE

Etablissement du projet d'EXE



Les principaux intervenants en phase travaux

Maîtrise d'ouvrage



MINISTÈRE DES INFRASTRUCTURES ÉCONOMIQUES
CELLULE DE SUIVI DES PROJETS C2D
CSP – C2D - MIE

MOA



MOA délégué

Groupement d'entreprise



GC



*/ Spie fondations
Fondations spéciales*

Maîtrise d'œuvre

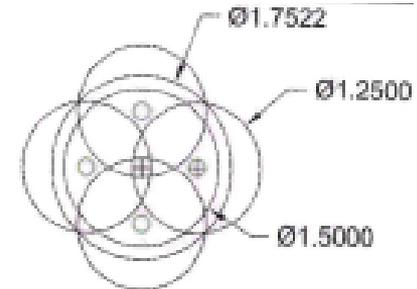
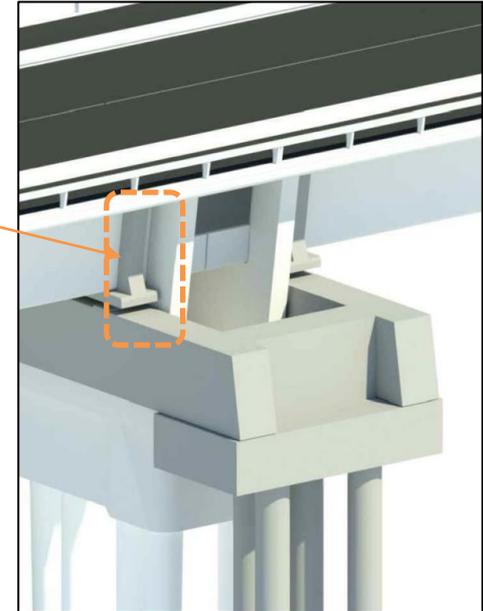


*Mission de visa
(ST Géotechnique: Terrasol)*

Etablissement du projet d'EXE

Solution de variante retenue

- Affranchissement des piles existantes dans le transfert des charges vers les nouvelles fondations
- Nouvelles fondations sur 8 pieux ϕ 1500
 - (au lieu des 6 pieux ϕ 2000 de la conception JMI)
 - Forés tubés dans les vases (tubes perdus)
 - Forés sous boue
 - Renforcés en pointe par 4 colonnes de Jet Grouting mono-jet ϕ 1250 (section renforcée 2.4m^2 - $D_{\text{eq}}=1.75\text{m}$)
 - Base des colonnes 1m au dessus des pieux existants



Les enjeux

Pieux nouveaux

- Non interception des fondations existantes à la foration
- Cote de base des pieux pour éviter les risques de déchaussement
- Cote d'arrêt des tubages

Reconnaissance de l'existant

Jet Grouting

- Validation du terme de pointe des fondations renforcées
- Diamètre des colonnes (validation & contrôle)
- Résistance structurelle des colonnes

Validation des paramètres géotechniques (campagnes hétérogènes)

Etablissement du projet d'EXE



Reconnaissance de l'existant

Fiabilisation des cotes de base des pieux

- Essais sismique parallèle
- Comparaison aux données d'archive
- Cote conservative retenue (la plus haute)

Piles		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Base des pieux existants (m NGCI) DCE		-39.29	-57.29	-64.79	-64.29	-69.29	-64.79	-51.29
Base de pieux (NGCI) selon essais sismiques en parallèle	Ouest	-40.20	-57.38	-65.58	-65.20	-67.90	-65.70	-48.10
	Est	-43.80	-57.28	-65.58	-67.10	-69.60	-67.50	-48.70
Base des pieux (NGCI) retenue		-40.20	-57.28	-65.58	-65.20	-67.90	-65.70	-48.10
		-39.20*	-56.28*	-64.58*	-64.20*	-66.90*	-64.70*	-47.10*

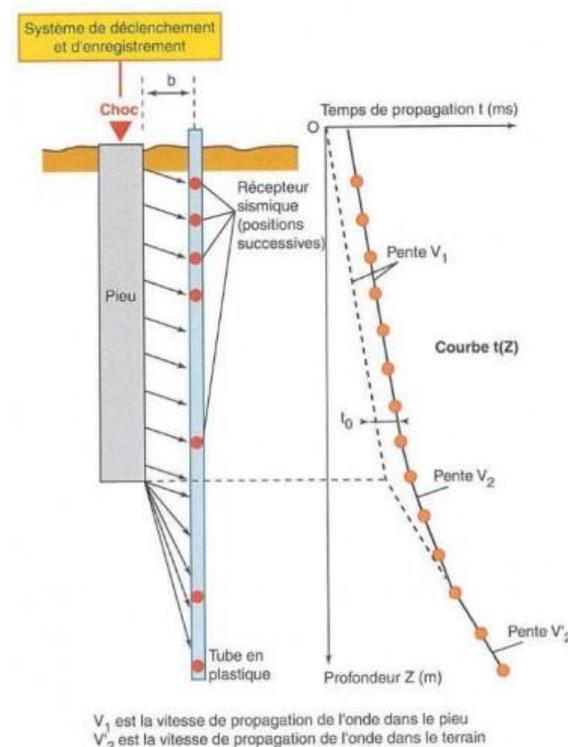


Image Innogeo

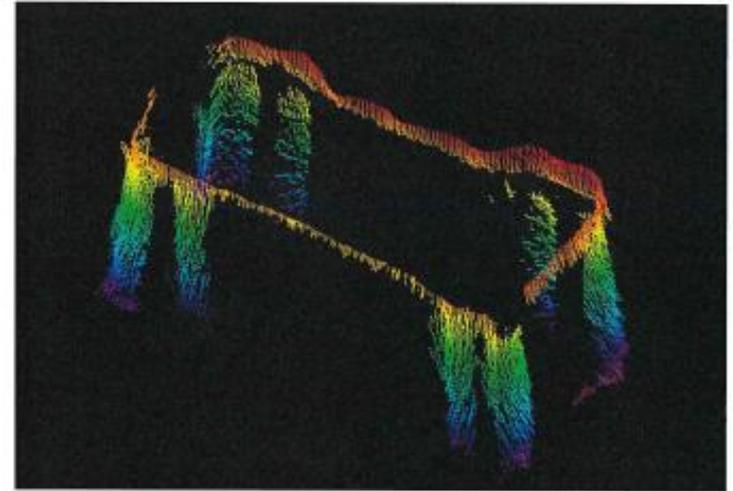
Etablissement du projet d'EXE



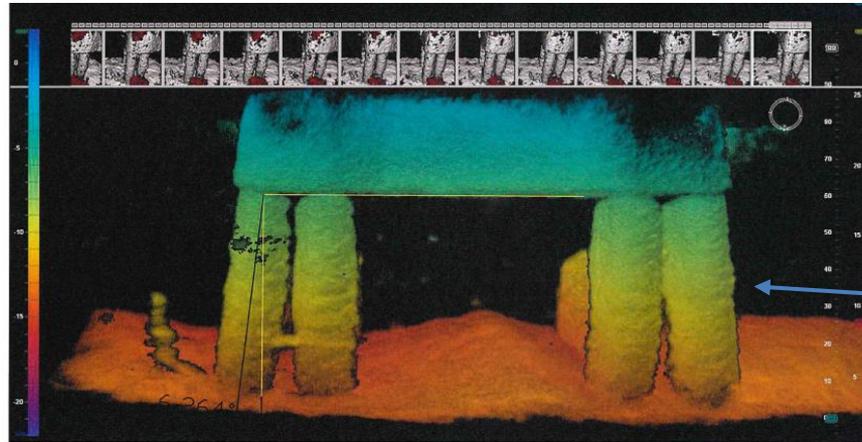
Reconnaissance de l'existant

Localisation des pieux: données disponibles

- Plan d'implantation des pieux de l'ouvrage initial
- Levés bathymétriques (mars 2018) jugés trop peu fiables
- Caméra acoustique (Aout 2018) pour fiabiliser (précision <math><1\text{cm}</math>)



Levé bathymétrique sur P4



Caméra acoustique sur P4

*Bonne résolution mais interprétation délicate
(nombreuses concrétions de forte épaisseur)*

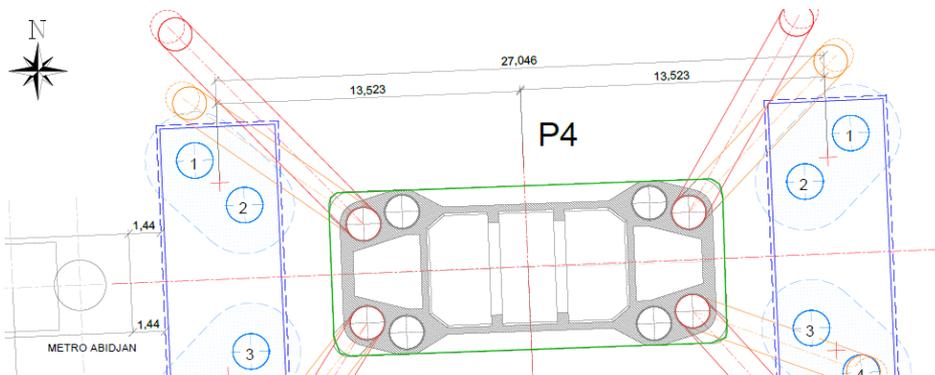
Etablissement du projet d'EXE



Implantation des nouveaux pieux

Approche double:

- Superposition
 - des levés des existants
 - pieux nouveaux y/c tolérances
 - Implantation (+/- 15cm)
 - Verticalité (2%)
- Calcul du profil de distance horizontale:
 - Sur la base du levé le plus problématique
 - Sans tenir compte des tolérances des nouveaux pieux
 - Recherche $d_{\min} > 1.5\text{m}$



	Cote base	Pieu nouv.	1/2 pile W				1/2 pile E				Pieu compl.	
			1	2	3	4	1	2	3	4	2	3
P1	-39.29	D min [m]	1.13	1.27	1.76	2.08	2.16	1.84	2.78	3.75	x	x
		Cote [NGCI]	-27	-16	-25.5	-39.29	-33	-19.5	-20	-37.5	x	x
P2	-57.29	D min [m]	1.54	1.51	1.87	1.55	1.97	1.18	2.89	3.30	x	x
		Cote [NGCI]	-57.29	-43.5	-34	-52.5	-57.29	-56	-43	-57.29	x	x
P3	-64.79	D min [m]	1.39	1.66	1.50	1.16	1.13	1.63	3.07	3.44	x	x
		Cote [NGCI]	-58	-37.5	-35.5	-54.5	-64.79	-44.5	-36	-58	x	x
P4	-64.29	D min [m]	1.91	1.79	2.32	2.92	3.08	2.33	1.94	2.25	x	x
		Cote [NGCI]	-38.5	-23	-20	-36	-41.5	-23.5	-23	-40.5	x	x
P5	-69.29	D min [m]	2.18	0.91	2.08	2.33	0.77	1.39	1.74	1.65	2.15	2.28
		Cote [NGCI]	-69.29	-69.29	-55	-69.29	-68.5	-46.5	-53.5	-69.29	2.15	2.28
P6	-64.79	D min [m]	2.74	2.21	2.09	2.53	3.28	2.51	1.62	1.72	x	x
		Cote [NGCI]	-37	-21	-22.5	-39	-37	-20.5	-20.5	-35	x	x
P7	-51.29	D min [m]	1.08	1.29	1.48	1.55	1.45	1.46	1.64	1.89	x	x
		Cote [NGCI]	-46	-28	-23.5	-39.5	-43	-25.5	-22	-37	x	x



Cote d'arrêt des tubages

Critère triple

- Tubage sur la hauteur des vases (protection corrosion)
- Non poinçonnement des terrains par le béton frais sous la base du tube
- Stabilité du tubage sous poids propre (par frottement)

Etablissement du projet d'EXE



Jet Grouting

Validation de la résistance de pointe

- Essais de chargement sur pieu renforcé en pointe
- Essais à terre dans les sables
- 3 essais interprétés conjointement:
 - Pieu 880mm pointe neutralisée
 - Pieu 880mm pointe classique
 - Pieu 880 sur colonne Jet Grouting (1050mm)

Validation $k_p = 3$ dans les sables



Etablissement du projet d'EXE



Jet Grouting

Validation caractéristiques mécaniques du jet

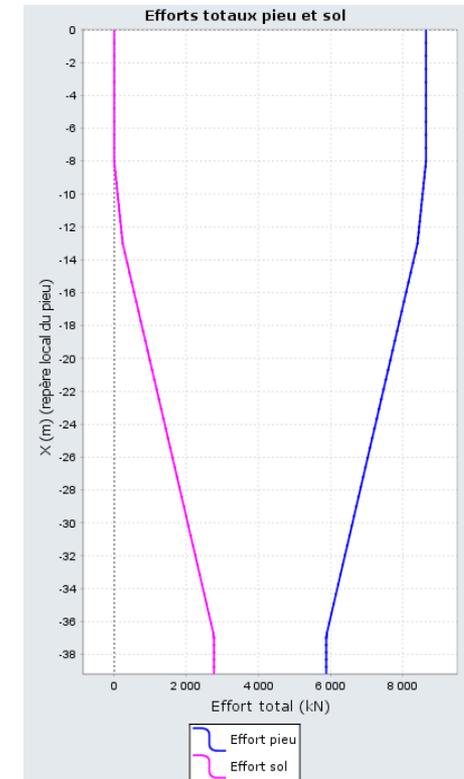
- Faible frottement mobilisé par les pieux en fût au dessus du Jet
- Faible section de contact fût béton/ Jet Grouting
- Contrainte importante dans le Jet

Critères de dimensionnement retenus:

- ELU: $\sigma_{\text{moy}} < 0.8 R_{ck}/1.5 \sim 0.53 R_{ck}$
- ELS_{rare}: $\sigma_{\text{moy}} < 0.45 R_{ck}$
- ELS_{qp}: $\sigma_{\text{moy}} < 0.3 R_{ck}$

Objectifs de résistance entre 10 et 13 MPa suivant les appuis:

- Validation des objectifs sur les colonnes d'essais (spoils + ep)
- Contrôles sur spoils et éprouvettes sur colonnes de l'ouvrage (Rc étalées entre 12 et 18 MPa)



Etablissement du projet d'EXE

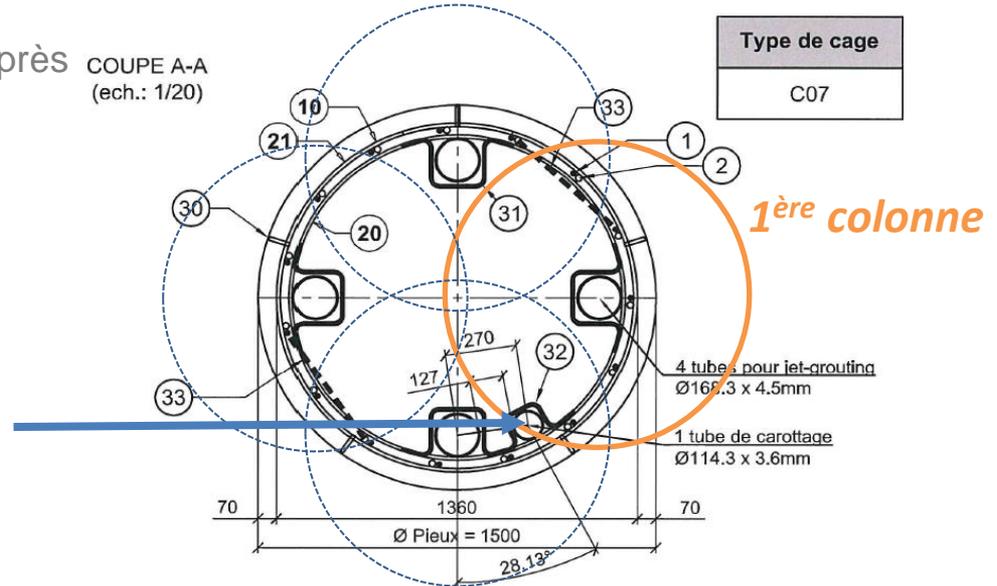


Jet Grouting

Contrôle des diamètres

- Pieu sus-jacent perturbant les méthodes géophysiques
- Contrôle mécanique par carottage après réalisation de la 1^{ère} colonne

Carottage dans tube de réservation





Réhabilitation du pont Félix Houphouët Boigny

Evènements et adaptations en phase réalisation



Evènements en phase chantier

Aucune interception de pieu existant à déplorer

Approfondissement des bases de tubes

- Pour assurer un ancrage de 5m dans les sables (suivi des cuttings)
- Pour contrer des instabilités de fond de pieu au forage
- **Approfondissement marginal sans impact sur les dimensionnements des fondations**

Descente spontanée des quelques tubages sous poids propre (P4,P5,P6)

- Réestimation des q_{sp} par rétro-analyse:
 - Vérification de la portance: **marge suffisante**
 - Augmentation des contraintes en tête de Jet Grouting:
 - Besoin de colonnes plus résistantes
 - Légères augmentation des critères de réception
- **Importance de ne pas être trop juste dans le projet d'exécution**

Evènements et adaptations en phase réalisation



P5-Est: descente du tubage sous la cote de fond de fût

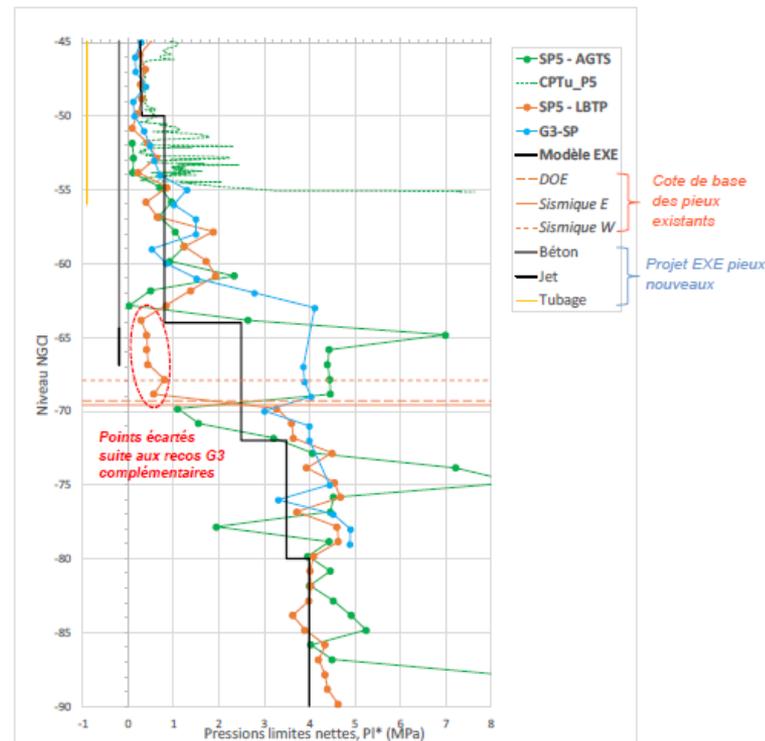
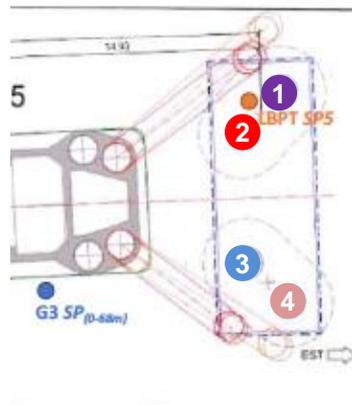
Projet EXE initial

- Référence base des pieux original: -67.9NGCI
- Base JG: -66.9NGCI
- Base fût/ sommet JG: -64.4NGCI
- Base tubage: -56NGCI

Descente spontanée des tubes

- P1: -61.4NGCI
- P2: -65.1NGCI
- P3: -59.4NGCI
- P4: -55.9NGCI

Pas d'incident de bétonnage



Evènements et adaptations en phase réalisation



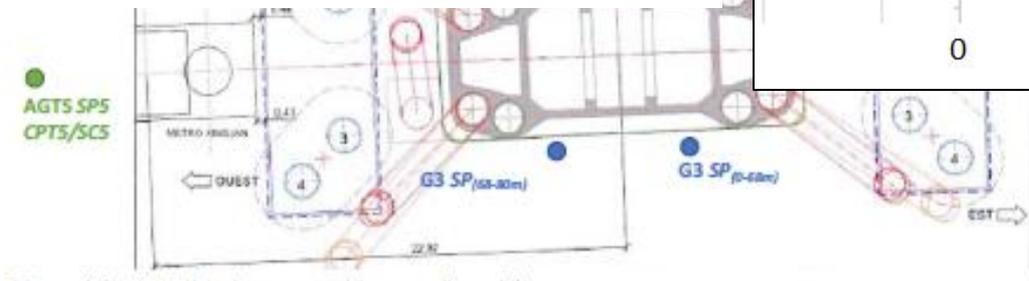
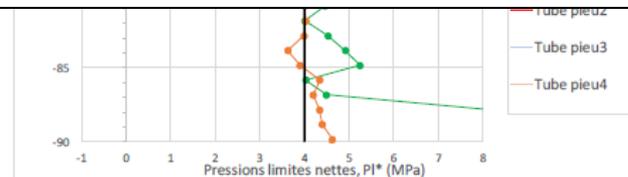
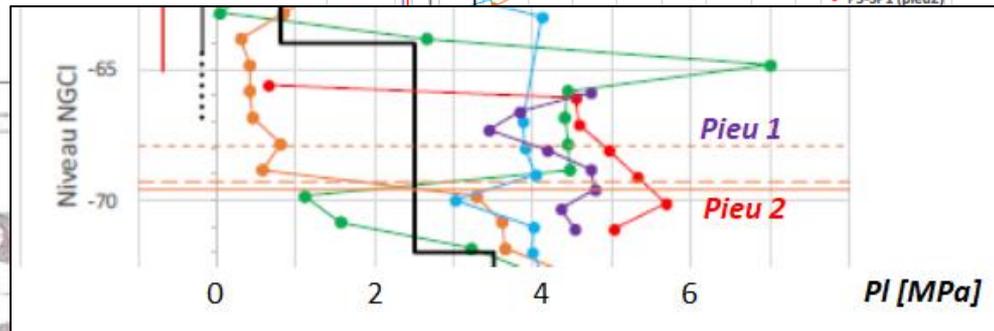
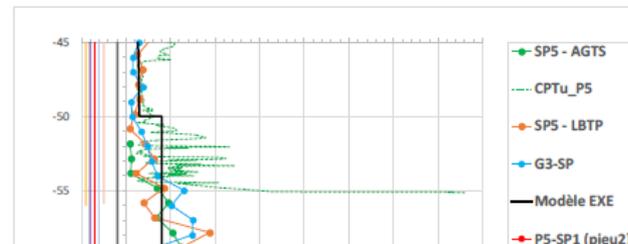
P5-Est: descente du tubage sous la cote de fond de fût

Problématiques de conception/dimensionnement

- Pieu (1) et 2: descente spontanée du tubage dans la zone d'ancrage
 - Terrains médiocres dans la zone?
 - Modification de la géométrie du JG?

Reconnaitances complémentaires

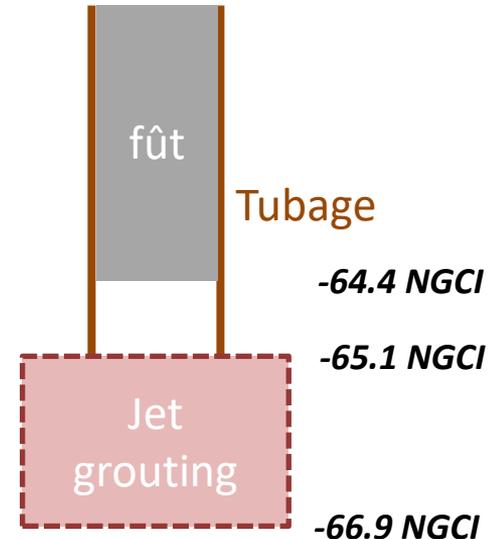
- Pieu 1 et Pieu 2
- 2 pressios via tubes de réservation



P5-Est: descente du tubage sous la cote de fond de fût

Problématiques de réalisation pieu 2

- Besoin de rétablir une continuité structurelle entre fût béton et renforcement en Jet
- Solution de constitution par Jet Grouting:
 - Pour chaque colonne
 - Hydrocurage (Jet à l'eau sans coulis) à la descente entre -66.4 et -66.9 NGCI
 - Forage jusqu'à la cote -66.9NGCI
 - Jet à la remontée entre -66.9 et -64.4
 - Délai de 4 jours entre deux colonnes du pieu 2
- Contrôle a posteriori:
 - Un carottage toute hauteur au centre de chaque colonne (avec $2R_c$ sur béton, $2R_c$ sur jet)
 - Contrôle sonique sur 6 trajets (intégrité à cœur)





Conception initiale (1950)

- Un ouvrage répondant à une forte demande industrielle et urbanistique
- Un ouvrage ayant requis des techniques hors pair liées à un contexte géologique et environnemental compliqué

Un ouvrage vieillissant ne répondant plus aux niveaux de fiabilité requis

- Remplacement par du neuf compliqué dans un contexte densément urbanisé
- Nécessité de réhabilitation lourde: remplacement des fondations
- Nécessité d'assurer une continuité de service: conditionnement des principes de réhabilitation par le biais de techniques de fondations spéciales

Un projet d'exécution devant s'adapter aux incertitudes et aléas

- Incertitudes sur les géométries, états des existants
- Aléas géotechniques 'classiques'
- Un besoin permanent d'adapter la conception et les méthodes aux différentes découvertes
- Projet d'exécution ne doit pas trop 'tiré'
- Bonne communication et synergie entre les différents intervenants nécessaires



terrasol

setec

setec
Tour Central Seine
42 - 52, quai de la Rapée
75583 Paris cedex 12

Tél +33 1 82 51 68 00
Fax +33 1 82 51 68 00
software@terrasol.com

Merci de votre attention

<http://www.terrasol.fr/>
alexandre.beaussier@setec.com