

ESSAIS DE CHARGEMENT DYNAMIQUES ET STATIQUES POUR FONDATIONS PROFONDES A L'INES

Dynamic load testing and static compression test on foundation pile at the INES

Jérôme GRIPPON¹, Raphaël DE TOURY²

¹ FRANKI FONDATION (Groupe FAYAT), Chaponost, France

² GINGER CEBTP, Elancourt, France

RESUME – Cette communication présente la réalisation d'une planche d'essais réalisée sur le chantier de construction du bâtiment principal de l'Institut National de l'Energie Solaire. Cette planche d'essais avait pour but d'établir une relation entre des essais de chargement statique axial et deux types d'essais de chargement dynamique sur des pieux, effectués dans des conditions de réalisation et des conditions géotechniques équivalentes.

ABSTRACT – This communication presents the realization of a trial board realized on the building site of the main building of the National Institute of the Solar energy. This trial board aimed at establishing a relation between static compression test and two types of dynamic load testing, made in conditions of realization and the equivalent geotechnical conditions.

1. Introduction

La construction du bâtiment de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) pour le compte du Conseil Général de Savoie sur le Parc d'Activités « Savoie Technolac » situé sur la commune LE BOURGET DU LAC (73) a nécessité la réalisation de fondations profondes.

FRANKI Fondation a réalisé des pieux vissés moulés SPIRE en diamètre 0,42–0,52–0,62m et des pieux Injectés Faible Pression à la tarière creuse en diamètre 0,7–0,82–0,92–1,02m.

Ces pieux ont été armés toute hauteur selon le minimum des règles parasismiques PS92 sur des profondeurs allant de 12,00 à 22,00m par rapport au terrain naturel.

Le Cahier des Clauses Techniques Particulières, établi par TECHNIP TPS, définissait les contrôles à mettre en œuvre, à savoir :

- ✓ Enregistrement des paramètres de forage et de bétonnage de tous les pieux
- ✓ Essais de résistance à la compression pour les bétons mis en œuvre
- ✓ Essais de contrôle par auscultation sonique pour 1 pieu sur 8 au minimum
- ✓ Essais de contrôle de portance par essais de chargement statique

Dans le cadre de ce projet, FRANKI fondation a proposé la réalisation d'une planche d'essais constituée des essais suivants :

- ✓ Essai dynamique de l'entreprise Pile Dynamics, Inc (PDI) avec système d'enregistrement PDA PAX (Pile Driving Analyser) et analyse au moyen du logiciel CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program)
- ✓ Essai dynamique des entreprises Testconsult / CEBTP selon la méthode SIMBAT

- ✓ Essai statique de pieu isolé sous compression axiale selon la norme NF P94-150

L'objectif de la planche d'essais était de tester sur un même pieu en conditions réelles deux types d'essais de chargement dynamique afin de mieux connaître les intérêts et les limites de ces essais tout en comparant les résultats obtenus avec un essai de chargement statique dans un même contexte géotechnique.

2. Conditions géotechniques

Le projet se situe géologiquement dans les alluvions modernes du lac du Bourget constituées généralement de formations argileuses ou sablo-argileuses avec parfois la présence de passées tourbeuses.

Les sondages réalisés par EG SOL ont mis en évidence les horizons suivants :

- ✓ Remblais graveleux à matrice argilo-sableuse ou sableuse
- ✓ Alluvions argileuses à sablo-argileuses
- ✓ Sables graveleux avec lentilles sablo-argileuses
- ✓ Sables graveleux de meilleure compacité

Tableau I. Synthèse géotechnique du site

Formation	Toit (m/TN)	Pl _e (MPa)
Remblais graveleux	0,0	/
Alluvions argileuses à sablo-argileuses	1,0	0,2
Sables graveleux	9,0 à 12,4	1,1
Sables graveleux compacts	18,0	1,5

3. Présentation des pieux de la planche d'essais

Dans le cadre de la planche d'essais, FRANKI Fondation a exécuté deux pieux d'essais notés P1 et P2 selon la configuration suivante :

- ✓ Pieu P1 : pieu réalisé à la tarière creuse en diamètre 0,52m ancré de 0,5m dans les sables graveleux présentant une charge admissible à l'ELS de 14,0 tonnes et une charge à la rupture Qu de 380 kN.
- ✓ Pieu P2 : pieu réalisé à la tarière creuse en diamètre 0,52m ancré de 2,00m dans les sables graveleux présentant une charge admissible à l'ELS de 32,0 tonnes et une charge à la rupture Qu de 760 kN.

Les pieux d'essais, constitués d'un béton C30/37 dosé à 350kg/m³ de CEM I 52,5 PM de classe XA1, ont été équipés sur toute leur hauteur de cage d'armatures constituées de 7 barres HA16 pour les filants.

La mise en œuvre des pieux d'essais a été contrôlée à l'aide d'un enregistreur de paramètres de forage et de bétonnage type TARALOG de LUTZ.

Pour les essais statiques, des pieux de réaction (R1 à R6) ont été réalisés avec un ancrage de 3,0m dans les sables graveleux et équipés de barre de traction GEWI 40.

Les pieux d'essais et les pieux de réaction ont été réalisés le 18/11/09.

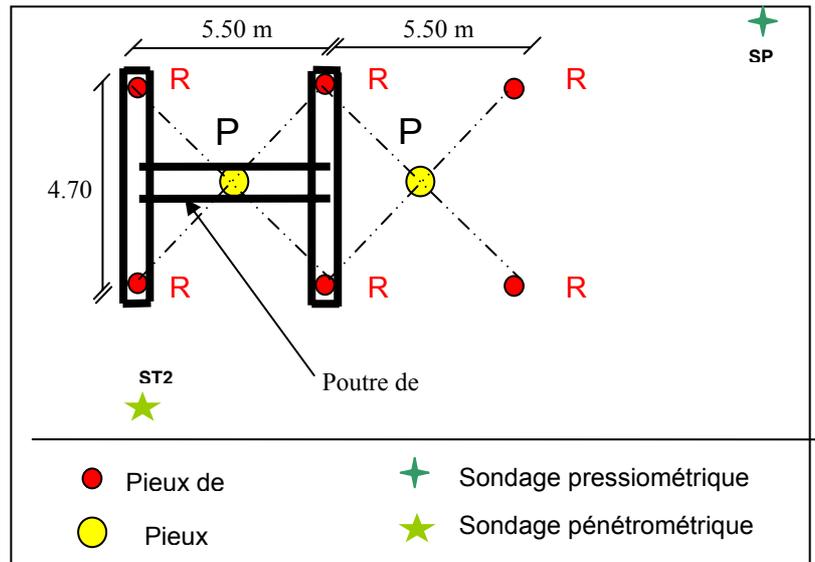


Figure 1. Dispositif nécessaire aux essais

4. Présentation des essais et des protocoles opératoires

Chacun pieu d'essai a été successivement testé dans l'ordre suivant :

- ✓ Essai PDA PAX de PDI
- ✓ Essai SIMBAT de TESTCONSULT / GINGER CEBTP
- ✓ Essai de chargement statique

4.1. Essai PDA PAX de PDI

L'instrumentation du pieu pour un essai PDA PAX est composé de 4 jauges de déformation de type pont complet et de 4 accéléromètres. Les jauges de déformation et les accéléromètres sont vissés sur des chevilles métalliques spéciales béton. Le vissage des jauges se fait associé à une résine adhésive.

Une jauge de déformation et un accéléromètre sont placés côte à côte à même hauteur soit environ 20cm du sol à chaque point cardinal.

Une lunette de visée de chantier externe permet de contrôler et mesurer le tassement définitif après chaque essai.

La centrale d'acquisition utilisée est le modèle PDA PAX. Le contrôle de l'essai se fait directement sur l'écran de la centrale PDA PAX.

Pour tous les essais de chargement dynamique, la masse utilisée était un trépan modifié d'une masse de 2,95 tonnes lâché en chute libre depuis une grue de chantier.

Le protocole opératoire concernant les essais de PDI correspond à des lâchers successifs de hauteur croissante jusqu'à obtention d'un enfoncement permanent de l'ordre de 5mm.

Ensuite un coup mobilisant bien la capacité du pieu est sélectionné pour être comparé via une analyse par calage à un modèle. Le logiciel utilisé pour cette opération est CAPWAP.

4.2. Essai SIMBAT de TESTCONSULT / GINGER CEBTP

L'instrumentation d'un essai SIMBAT est composé de 2 jauges de déformation de type jauge collée et de 2 accéléromètres. Les accéléromètres sont vissés au béton via des chevilles métalliques.

De même que pour l'essai précédent, une jauge de déformation est placée à côté et à même hauteur (environ 20cm du sol) qu'un accéléromètre. Les deux zones d'instrumentation étant diamétralement opposées.

Un théodolite relié à la centrale d'acquisition permet d'enregistrer l'enfoncement dynamique ainsi que l'enfoncement permanent.

Un calage de la double intégration de l'accélération est effectué pour chaque essai par rapport à l'enfoncement réel au moment de l'impact.

La centrale d'acquisition est constituée d'un petit boîtier indépendant. Le contrôle de l'essai peut se faire à partir du boîtier ou bien via un ordinateur que l'on peut relier à la centrale d'acquisition.

Le protocole opératoire correspond à une série de coup en croissance/décroissance jusqu'à obtention d'un enfoncement permanent de l'ordre de 5mm.

Après élimination de certains coups non représentatifs, l'ensemble des essais est utilisé pour extraire la composante statique des efforts dynamiques mesurés.

Les méthodes de corrélation utilisées sont ensuite celles de Paquet ou Case.



Figure 2. Essai de chargement dynamique avec théodolite SIMBAT

4.3. Essai de chargement statique

Le dispositif pour chaque essai de chargement statique est composé de 4 pieux de réaction. Une poutre métallique principale et deux poutres métalliques perpendiculaires à la première sont ancrées sur ces pieux à l'aide de barre de traction suivant un montage en « I » (voir figure 3). L'instrumentation est composée d'un vérin qui exercera la force statique en tête du pieu et d'un capteur de déplacement qui mesurera l'enfoncement. Une centrale d'acquisition enregistre les données.

Le protocole est mené suivant la norme NF P 94-150-1 à savoir deux étapes :

- un cycle de préparation avec chargement à $0,1Q_{max}$ pendant 15 min.
- un cycle de chargement/déchargement jusqu'à Q_{max} par paliers



Figure 3. Dispositif essai de chargement statique

5. Résultats des essais

5.1. Résultat de l'essai PDA PAX

Il a été mesuré par l'appareil un rendement global du mouton de 36% (énergie transmise au pieu par rapport à l'énergie apportée par le mouton). Cette valeur est tout à fait cohérente avec le retour d'expérience sur d'autres essais.

Le rendement du battage est mesuré en effectuant le rapport entre l'énergie potentielle de la masse suspendue et l'énergie mécanique reçue en tête de pieu obtenue à partir de la force et du déplacement mesurés.

Les contraintes mesurées dans la tête des pieux sont restées raisonnables (20MPa) vis-à-vis de la limite de plasticité.

Les tassements mesurés sur les derniers coups étaient de l'ordre de 3 à 4 mm par coup ce qui correspondait à l'ordre de grandeur recherché d'après le mode opératoire. Ces ordres de grandeur permettent de solliciter correctement l'effort de pointe tout en étant suffisamment éloigné de la zone de rupture du pieu.

Le résultat des contrôles par impédance effectués à l'issue de ces tests du pieu n'ont montré aucune modification particulière avec les résultats obtenus avant le démarrage des tests. Le pieu n'a donc subi aucun dommage particulier.

Les contrôles par impédance sont des mesures de propagation d'ondes générées par l'action d'un marteau sur la tête du pieu. Le retour de l'onde (écho) et l'impédance (analyse fréquentiel du signal) permettent de vérifier l'intégrité du pieu.

Pour l'évaluation de la résistance statique, une méthode de calage simulant les caractéristiques du pieu et du sol est utilisée et comparée à un coup référence.

Concernant le pieu 1, le coup référence sélectionné pour la comparaison par calage a été le coup n°12, le mouton ayant été lâché à une hauteur de 1,5m. L'enfoncement correspondant a été de 3 mm.

La résistance ultime du pieu 1 a été évaluée à 820 kN avec l'indication que les 2/3 de la résistance du sol vis-à-vis du pieu se trouve concentrée dans le bas du pieu. Cette répartition est déduite par modélisation du comportement sol-pieu.

D'après la société PDI, la précision de la concentration de la résistance est de précision inférieure à la prédiction de la résistance statique.

Concernant le pieu 2, le coup référence sélectionné pour la comparaison par calage a été le coup n°6, le mouton ayant été lâché à une hauteur de 2m. L'enfoncement permanent correspondant a été de 4mm.

La résistance ultime du pieu a été évaluée à 1180 kN avec l'indication que la moitié de la résistance du sol vis-à-vis du pieu se trouve concentrée en bas du pieu. Une autre concentration de l'ordre de 100 kN a été observée à 2m dans le sol.

5.2. Résultat de l'essai SIMBAT

Les essais ont été menés jusqu'à une hauteur de 2m sur le pieu 1 (à trois reprises) et le pieu 2 (à une seule reprise). L'enfoncement correspondant à la dernière chute du mouton sur le pieu 1 a été de 5.71 mm ce qui était légèrement au dessus de ce qui était visé d'après le protocole.

La sollicitation du pieu par l'essai de chargement dynamique de la veille a probablement diminué les frottements latéraux des pieux. La mesure de raideur effectuée au cours des contrôles par impédance ont bien démontré ce phénomène car la raideur mesurée a été quasiment divisée par deux.

Pour la même hauteur de chute, nous avons donc observé un enfoncement plus grand. L'enfoncement n'a en effet pas dépassé 5mm avec l'essai PDA.

Les contrôles par impédance ont révélé sur le pieu 1 un retour d'onde vers 5m par rapport au sol tout en conservant un écho de fond bien lisible. Ce signal peut correspondre à une fissure de tension ou bien une modification des paramètres du sol. Nous travaillerons à mieux comprendre ce phénomène dans nos travaux ultérieurs.

Le traitement des signaux après correction de la double intégration de l'accélération permet de mesurer la force dynamique pour chacun des essais.

Ensuite les signaux sont exploités suivant la méthode Paquet :

$$F_{\text{stat}} = F_{\text{dyn}} - K \times \text{pen}$$

F_{stat} : force statique maximale admissible pour le pieu

F_{dyn} : force dynamique mesurée au cours de l'essai

K : constante

pen : pénétration, enfoncement résiduel du pieu

Cette méthode part du principe que physiquement, il ne peut y avoir de relation entre force statique et la hauteur de chute du mouton et donc que la force statique est une composante continue de la relation F_{stat} en fonction de l'enfoncement.

Le facteur K est donc à déterminer afin d'estimer la résistance statique.

Cette résistance statique a été mesurée à 950 kN pour le pieu 1 et 1050 kN pour le pieu 2.

5.3. Résultat des essais de chargement statiques

L'essai de chargement du premier pieu a été mené jusqu'à $Q_{max} = 1000$ kN.

L'enfoncement cumulé total a été de 73 mm.

La charge critique de fluage Q_c calculée par construction graphique selon la norme NF P 94 150-1 pour le pieu 1 est de 800 kN.

La charge de rupture Q_u (correspondant à un enfoncement du dixième du diamètre soit 52mm) est elle de 950 kN.

L'essai de chargement du deuxième pieu a été mené jusqu'à $Q_{max} = 1300$ kN.

L'enfoncement total cumulé a été de 90 mm.

La charge critique de fluage Q_c calculée par construction graphique selon la norme NF P 94 150-1 pour le pieu 2 est de 970 kN.

La charge de rupture Q_u (correspondant à un enfoncement du dixième du diamètre soit 52mm) est elle de 1200 kN.

Les résultats sont présentés dans le tableau II.

Tableau II. Récapitulatif des résultats

(en kN)	PDA PAX	SIMBAT	Statique - Q_c	Statique- Q_u
Pieu 1	820	950	800	950
Pieu 2	1180	1050	970	1200

6. Conclusions

Les différents essais de chargement (dynamiques et statique) ont fournis, en terme de capacité portante des pieux, des résultats relativement proches en considérant des pieux réalisés selon la même méthodologie dans un contexte géotechnique équivalent.

Même si les écarts ne sont pas négligeables (maximum 15%), le comportement statique du pieu est tout de même bien appréhendé à travers les essais de chargement dynamique.

Concernant les incertitudes, il est à noter que celle liée au protocole n'est pas négligeable car les essais de chargement dynamique et statique ont été réalisés sur les mêmes pieux. Les caractéristiques mécaniques de l'interaction pieu/sol ont en effet été modifiées au fur et à mesure des essais.

Il reste également une incertitude sur la valeur statique à comparer aux essais de chargement dynamique (notamment que doit-on choisir entre Q_c et Q_u ?). Ces correspondances et l'augmentation de la précision des prévisions feront l'objet de futures recherches.

De même, la poursuite du développement des essais dynamiques avec la possibilité de définir avec certitude la part due à l'effort de pointe et celle due au frottement permettrait d'avancer dans la norme de réalisation des essais dynamiques et de pouvoir ainsi les généraliser sur les chantiers.

En conclusion, à condition que les essais de chargement dynamique aient été validés par un essai de chargement statique tel que le recommande les normes EUROCODE 7, il devient tout à fait possible d'estimer la portance statique à travers les essais de chargement dynamique.

L'intérêt des essais dynamiques réside dans la rapidité de mise en œuvre, le coût relativement faible (non nécessité d'un système de réaction) et la possibilité d'obtenir une information sur la capacité ultime du pieu.

L'essai dynamique peut ainsi être réalisé dans le cadre d'une vérification de la portance mais il peut également être utilisé sur un pieu d'essai afin de permettre une optimisation du dimensionnement.

Pour expliquer la différence de valeur entre la capacité portante calculée et la capacité portante déterminée lors des différents essais, il faut savoir que lors du dimensionnement réglementaire des pieux, le terme de frottement avait été neutralisé sur la hauteur des terrains compressibles. La réalisation de la planche d'essais avant la réalisation du chantier aurait permis de prendre en compte une valeur de frottement q_s plus importante (valeur de 30 kPa selon les résultats des essais) mais néanmoins limitée à 10 kPa selon le DTU 13.2 (pour une pression limite de 0.2 MPa) au lieu de 0 kPa sur les 11.00 premiers mètres pour les terrains compressibles. Une optimisation des diamètres et des longueurs auraient ainsi pu être possible.

7. Références bibliographiques

- Cahier des Charges du pieu vissé moulé SPIRE FRANKI du 20 novembre 2009
- DTU 13.2 Fondations profondes pour le bâtiment – Norme P11-212 de septembre 1992
- Essai de chargement dynamique axial d'un élément de fondation profonde – Norme française - XP P94-152 de décembre 1997
- Essai statique de pieu isolé sous charge axiale – Méthode d'essai LPC n°31 de février 1989
Michel BUSTAMENTE et Jean-François JEZEQUEL
- Essai statique de pieu isolé sous compression axiale – Norme française - NF P94-150 d'octobre 1991
- Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales
- Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of piles – American Society for Testing and Materials (ASTM), Designation D 4945-96