

LE PROJET NATIONAL VIBROFONÇAGE

GONIN Henri¹, BOREL Serge¹, LE TIRANT Pierre³

¹Directeur Technique du Projet National Vibrofonçage, IREX, 10, rue de Washington, 75008 Paris

²Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58 bd Lefebvre, F-75015 Paris Cedex 15, Serge.Borel@lcpc.fr

³IREX, 10, rue de Washington, 75008 Paris

RESUME : Le projet national vibrofonçage (2000-2003) s'est fixé comme objectif de promouvoir cette technique d'installation des pieux et profilés en établissant un guide technique documenté. Des travaux de recherche spécifiques portent sur la prévision du vibrofonçage, la capacité portante des pieux vibrofoncés et les vibrations transmises à l'environnement. Cette communication présente le programme de recherche en insistant sur les enjeux et les moyens mis en œuvre. Le comportement des pieux vibrofoncés est illustré par les essais réalisés sur le port de Montoir.

MOTS-CLEFS : vibrofonçage, pieu, essai, portance

ABSTRACT : The National research project on vibratory driving (2000-2003) aims to promote this technique of installation by producing a well documented technical manual. Specific researches are carried out on the vibratory drivability, the bearing capacity of vibratory driven piles and the vibrations transmitted to the ground. In this paper, the project is presented. Behaviour of vibratory driven piles is illustrated with the tests performed in the harbour of Montoir.

KEY-WORDS : vibratory driving, pile, test, bearing capacity

1. Introduction

Le fonçage (ou l'arrachage) par vibrations de pieux ou de palplanches, concurremment ou en association avec le battage, s'est développé dans le monde dès les années 50, pour des raisons de coût, de rapidité de mise en œuvre et de nuisances plus réduites en milieu urbain. Mais alors que des modèles prévisionnels de battage ont été utilisés et progressivement améliorés depuis les années 60, la mise en œuvre du vibrofonçage est restée très empirique. C'est seulement depuis quelques années que des travaux de recherche ont été entrepris en Europe sur ce sujet.

A la suite d'une étude exploratoire (mars 1998), puis d'une étude de faisabilité (janvier 99) conduites par l'Institut pour la Recherche et l'Expérimentation en Génie Civil (IREX), il a été décidé d'entreprendre une recherche visant à répondre aux besoins des utilisateurs en améliorant les méthodes de prévision du comportement de l'élément foncé, de sa capacité portante après mise en place par ce procédé (sans surbattage de contrôle) et des nuisances générées dans l'environnement.

Le projet National Vibrofonçage, qui regroupe une vingtaine de partenaires (Maîtres d'Ouvrages, Entreprises, Fournisseurs de matériels, Bureaux d'Études, Laboratoires) fait partie des opérations labellisées par le Réseau Génie Civil et Urbain (RGC&U). Il reçoit un soutien financier du Ministère de l'Équipement. Le projet commencé en 2000 doit s'achever fin 2003.

Le principe du vibrofonçage consiste à soumettre l'élément à foncer à des vibrations forcées à l'aide d'un vibreur qui exerce sur lui une double action : un effort statique permanent, dû au « poids mort », et un effort harmonique, généré par la rotation de masselottes excentrées tournant symétriquement par rapport à l'axe de l'élément (figure 1).

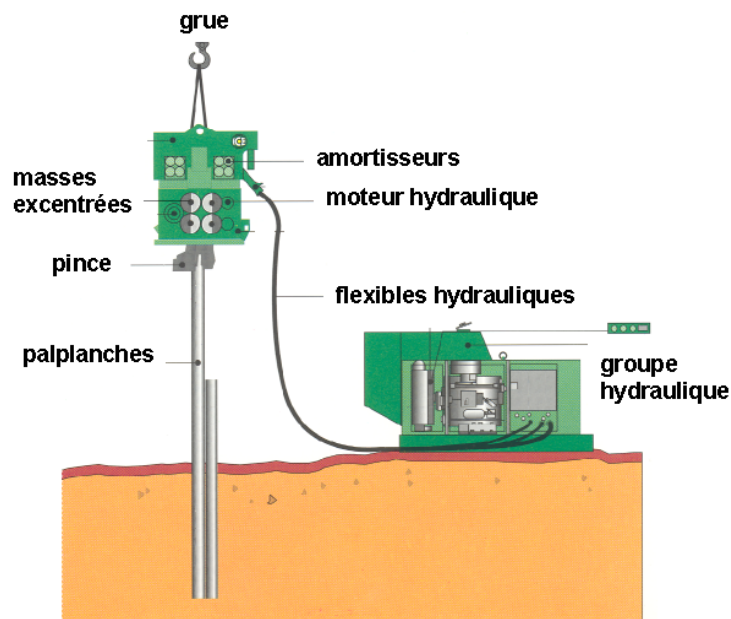


Figure 1. Schéma d'un équipement de vibrofonçage (d'après ICE)

1.1. Objectifs de la recherche

Lorsqu'il peut être mis en œuvre, le vibrofonçage s'avère plus rapide et plus économique que tout autre procédé de mise en place de pieux et palplanches : l'économie par rapport au battage peut atteindre 30%. Cette économie peut être encore plus importante si le recours au surbattage est évité. De plus, les nuisances (vibrations) dans l'environnement immédiat sont plus faibles que celles qui résultent du battage. La promotion de ce procédé ne peut donc que bénéficier à l'ensemble des acteurs de la profession du Génie Civil.

C'est bien là l'objectif premier de la recherche : promouvoir la technique du vibrofonçage, en établissant un guide pratique, bien documenté, du bon usage de cette technique pour la mise en place des pieux et des palplanches. Ce guide comportera : une *partie technique*, ramenée à l'essentiel, qui définira les paramètres sensibles pour effectuer une prévision et donnera des conseils à l'utilisateur sur les choix à faire ; une *partie appliquée* qui décrira les différents types de matériels et conseillera sur leur mise en œuvre suivant les sites ; enfin une *partie documentaire* qui fera état des expérimentations effectuées au cours de la recherche.

1.2. Programme du projet

Le programme prévoit trois tranches annuelles dont la réalisation, pour certaines parties, peut se superposer dans le temps.

Le travail de la première tranche comporte les quatre actions suivantes :

- *action 1* : enquête sur les pratiques du vibrofonçage ;
- *action 2* : constitution d'une base de données ;
- *action 3* : ré-analyse des données des recherches existantes (HIPERVIB et SIPDIS) ;
- *action 4* : cahier des charges du programme expérimental.

Cette première tranche est achevée, à l'exception de la constitution de la base de données qui se poursuit durant l'ensemble du projet.

La deuxième tranche comporte cinq actions expérimentales :

- *action 1* : essais en cours de vibrofonçage et essai de chargement à Montoir ;
- *action 2* : mesures en tête de tubes vibrofonçés à Dunkerque ;
- *action 3* : expérimentation dans le site du Havre ;
- *action 4* : expérimentation dans le site de Merville ;
- *action 5* : essais en chambre d'étalonnage par le CERMES à Marne la Vallée.

Les essais de Montoir et de Dunkerque ont été réalisés en septembre 2001 et en février 2002 à l'occasion de chantiers des Ports Autonomes de Nantes et de Dunkerque. Les essais du Havre et de Merville seront réalisés sur des sites expérimentaux spécifiques, en dehors de contraintes des chantiers. Ils sont programmés pour l'automne 2002.

La troisième tranche aboutira à l'élaboration de recommandations sous la forme d'un guide pratique et à la diffusion des résultats. Elle devrait être terminée en 2003.

1.3. Quelques recherches récentes dans le domaine du vibrofonçage

Plusieurs projets de recherche ont été lancés en Europe au cours des années 1990. On peut notamment citer les projet HIPERVIB et SIPDIS qui ont mobilisé des efforts importants.

Le projet HIPERVIB (HIGH PERFORMANCE VIBRATORY pile drivers based on novel electromagnetic actuation system and improved understanding of soil dynamics) est un projet européen réalisé dans le cadre d'un programme BRITE EURAM (1992-1995). Il a rassemblé l'entreprise PTC (France), l'Université de Sheffield (Royaume Uni), le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (Belgique) et l'entreprise Jan de Nul (Belgique). Ce projet a comporté le développement de modèles d'interaction entre le sol et le pieu lors du vibrofonçage (Holeyman et Legrand, 1997), l'amélioration des vibrateurs à moment d'excentricité variable et la réalisation d'essais de vibrofonçage sur site. Au total, une vingtaine d'instrumentation de vibrofonçage ont été réalisés sur dix sites différents en Belgique.

Le projet SIPDIS (Development of a new Soil Investigation Procedure Determining the Installation of Steel sheet piling and the impact to the environment) mené notamment par Profil Arbed (Luxembourg) et British Steel (Royaume Uni) dans le cadre d'un programme européen ECSC (European Coal and Steel Community). Ce projet (1996-1998) avait pour objectif de développer une méthode de reconnaissance permettant d'améliorer le choix du matériel de mise en place (battage et vibrofonçage, avec éventuellement lançage). Il a comporté la mise au point d'une sonde spécifique et le développement d'un modèle prévisionnel de vibrofonçage. Des essais de vibrofonçage de pieux instrumentés ont été réalisés sur site à Hambourg (Allemagne) dans un sable dense et à Immingham (Royaume Uni) dans une argile raide.

Malheureusement pour la communauté professionnelle et scientifique, les projets HIPERVIB et SIPDIS n'ont fait l'objet de pratiquement aucune publication, ce qui est fort surprenant, compte-tenu des objectifs ambitieux et des moyens techniques et financiers importants qui ont été consacrés à ces recherches. Une partie des résultats a été communiquée pour être analysée dans le cadre du présent projet national vibrofonçage.

Plus récemment, l'Institut Royal de Technologie (Suède) a étudié la vibrofonçabilité des palplanches dans les sols non cohérents. Ce projet de recherche a comporté à la fois des essais en laboratoire (Viking et Bodare, 1998) et des essais sur site (Viking, 2002).

Pour une bibliographie générale sur le vibrofonçage, on peut se reporter à la synthèse rédigée par Viking (1997). On peut également consulter la conférence prononcée par Holeyman (2000) qui présente les principaux enjeux actuels du vibrofonçage.

2. La pénétration par vibrofonçage

2.1. Mécanismes en jeux

Lors du battage, une onde de choc véhicule une discontinuité de vitesse particulière. Au contact du sol le long de l'élément, il y a rupture par cisaillement. Après une phase initiale de dégradation, la résistance au cisaillement du sol, compte tenu de l'échelle de temps (quelques millièmes de seconde) et de l'amplitude de la vitesse particulière (quelques mètres par seconde) est bien représentée par un facteur de proportionnalité entre la vitesse particulière et la résistance limite (facteur K exprimé par exemple en kPa par m/s). Cette hypothèse simple s'avère en général suffisante et appropriée. Elle revient à supposer un amortissement de l'onde incidente suivant une loi exponentielle en fonction de la fiche en sol homogène.

En pointe, l'hypothèse d'une réaction rigide plastique est en général suffisante pour bien représenter le comportement du sol ; cela revient à admettre que toute l'énergie qui n'est pas utilisée pour la pénétration est réfléchiée en onde montante. Toutefois, un paramètre élasto-plastique (souvent appelé « quake ») est généralement utilisé dans les modèles.

Pour le vibrofonçage, la situation n'est pas la même pour la résistance au cisaillement du sol au contact de l'élément foncé. La validité de l'hypothèse utilisée en battage n'est plus assurée, compte tenu de l'échelle de temps (période de plusieurs dizaines de millisecondes) et de l'amplitude de la vitesse particulière (quelques décimètres par seconde). L'hypothèse d'un frottement ultime de Coulomb et d'une loi de comportement élasto-plastique doit encore être testée sur des résultats d'expérimentations bien documentées, ainsi que l'incidence d'une variation de l'amplitude des vitesses particulières (donc de la fréquence) sur la résistance au cisaillement, après la phase de dégradation initiale.

En pointe, les mesures de force et de vitesse particulière permettent de discuter la validité de l'hypothèse rigide plastique, ainsi que d'apprécier la dégradation des caractéristiques des sols par rapport aux valeurs statiques (par exemple, résistance de pointe au pénétromètre statique q_c).

2.2. Comportement du sol

Dans le vibrofonçage, le sol est soumis à des sollicitations de cisaillement alternées jusqu'à la rupture le long du fût ; il en résulte une dégradation de la résistance ultime qui rend possible et facilite la pénétration. En milieu saturé, cette dégradation est principalement due à des effets de dilatance (« boucle » de dilatance) qui entraînent un développement de surpressions interstitielles, et l'effondrement concomitant de la résistance au cisaillement qui peut aller jusqu'à s'annuler (liquéfaction). Ce phénomène étant transitoire, lorsque les pressions interstitielles sont dissipées, on devrait pouvoir compter sur une résistance au cisaillement comparable à l'initiale, voire majorée par densification. Mais ceci n'est pas confirmé expérimentalement, au contraire ! Les phénomènes sont complexes et n'ont pas été étudiés de manière complète à notre connaissance. Le problème de la portance d'éléments mis en place par vibrofonçage est controversé et l'un des buts de la recherche est de verser au dossier quelques expériences bien documentées supplémentaires permettant de définir des règles d'appréciation plus sûres de la portance d'éléments enfoncés dans le sol par vibrations.

2.3. Modélisation : interprétation des données expérimentales

C'est la possibilité qu'offrent les méthodes de mesures modernes d'accéder à des mesures physiques à une échelle de temps inférieure à la milliseconde qui nous permet de progresser dans la modélisation du vibrofonçage et dans l'interprétation des mesures en ce qui concerne la réaction du sol. Que doit-on mesurer et comment l'interpréter ?

En premier lieu, ce sont les paramètres dépendant du vibreur et de sa mise en œuvre qui doivent être contrôlés et mesurés : force de retenue de la suspension, qui vient en déduction du poids total ; force dynamique du vibreur, résultant de l'action des masselottes excentrées ; fréquence, ou pulsation ; puissance consommée.

Les mesures portent ensuite sur la vitesse moyenne d'enfoncement et la profondeur atteinte par l'élément, soit par mesures optiques, soit à l'aide d'un système mécanique.

Enfin, en une ou plusieurs sections de l'élément, des mesures d'accélération et de déformation peuvent permettre d'accéder aux valeurs moyennes dans une section des forces et vitesses particulières pendant plusieurs périodes consécutives.

La validation des mesures et l'étalonnage des différents capteurs peut être faite à l'aide d'essais à vide (élément librement suspendu). Les mesures sont enregistrées par échantillonnages sur une quinzaine de périodes par exemple (environ une demi-seconde).

Les échantillonnages recueillis pendant la pénétration peuvent être ensuite sélectionnés en ne retenant que ceux pour lesquels la vitesse moyenne de pénétration mesurée par ailleurs apparaît comme constante au second ordre près. On peut alors vérifier que les mesures des 10 à 20 périodes enregistrées correspondent bien à un régime stable périodique, c'est-à-dire à une réaction d'équilibre du sol : hors les phases initiales accélérées, pour lesquelles le sol offre peu de résistance, la pénétration correspond à une succession d'équilibres (régime stable et vitesse moyenne constante) et d'accélération de courte durée (excès des forces actives sur les forces résistantes). L'utilisation d'un modèle aidera à déterminer, pour chaque échantillonnage retenu, quelles sont les réactions du sol et les paramètres qui peuvent le mieux les représenter, en cherchant à obtenir, avec une excitation en tête calée sur les mesures expérimentales de forces par exemple, une réponse en vitesses dans un régime stable se rapprochant au mieux des mesures. On voit donc qu'une bonne interprétation des mesures passe par l'utilisation d'un modèle bien adapté.

La synthèse de mesures bien interprétées devrait permettre de définir des règles pour le choix des paramètres de sol à introduire dans des modèles de prévision simplifiés (corps rigide), suivant les conditions de sol telles qu'elles sont connues sur un site donné.

3. La portance des éléments vibrofoncés

3.1. Position du problème

Ce problème a été évoqué plus haut : étant donné que le fonçage par vibrations est possible grâce à une importante dégradation de la résistance au cisaillement des sols pendant la pénétration, et notamment du frottement sur la surface latérale, doit-on systématiquement considérer que cette dégradation affecte durablement le contact avec le sol et que la portance d'un élément mis en place de cette façon est minorée par rapport à celle d'un autre mis en place dans les mêmes conditions de sol par une autre méthode (battage par exemple), et de combien ? Comment le type de sol intervient-il dans ce phénomène ?

3.2. Résultats expérimentaux existants

Les résultats expérimentaux concernant la capacité portante des pieux vibrofoncés sont rares. Ces essais ont été réalisés à l'occasion de recherches spécifiques (Briaud et al., 1990 et Borel et al., 2002) et de chantiers (Mosher, 1990 ; Mazurkiewicz, 1975) au moment du choix de la méthode de mise en place des pieux. Ils ont parfois été motivés par des chantiers où les essais de chargement de contrôle des pieux vibrofoncés ont montré des capacités portantes bien inférieures à ce qui était prévu (Mosher, 1990).

Tableau 1. Quelques essais de chargement statique de pieux vibrofoncés

référence	nombre d'essais	sol	type de pieu	portance vibrofoncé/battu
Mazurkiewicz (1975)	11 battus 11 vibrofoncés	sable moyennement dense et argile sableuse	béton préfabriqué Ø340 mm L=13 à 27m	-40% en moyenne (-10 à -60%)
Braaker* (1986)	4 battus 4 vibrofoncés	sable lâche et sable moyen	profilés acier	-15% en moyenne (-10 à -30%)
Briaud et al. (1990)	4 battus 4 vibrofoncés	remblai sableux moyennement dense	HP14x73 L=9m	égale en moyenne -70% (pointe) +70% (latéral)
Mosher (1990)	5 battus 5 vibrofoncés	sable moyennement dense	HP 14x73 L=13 à 22m	-15 à -25% (total) -10% (latéral)
Borel et al. (2002)	1 battu 1 vibrofoncé	marnes et caillasses	palplanches L2S L=9m instrumentées	-35 % (total) -20 % (latéral)
Borel et al. (2002)	1 battu 1 vibrofoncé	graves denses du Rhin	palplanches PU20 L=9m instrumentées (traction)	-25 % (total et latéral)

D'une façon générale, les différentes observations, principalement réalisées dans des sables moyennement denses, montrent que la capacité portante des pieux vibrofoncés est jusqu'à 40% inférieure à celle des pieux battus (tableau 1). Cette réduction de portance serait principalement due à une très forte réduction de la résistance en pointe. Le vibrofonçage ne conduirait pas au compactage du sol sous la pointe comme cela est le cas avec le battage. Par contre, les différences de frottement latéral entre pieux battus et pieux vibrofoncés sont généralement moins importantes.

3.3. Pratique internationale

Une enquête sur la pratique internationale du vibrofonçage a montré qu'il n'y a pas de méthode établie pour calculer la portance des pieux vibrofoncés. Au stade du projet, il existe certaines pratiques qui consistent à assimiler les pieux vibrofoncés aux pieux battus, en prenant parfois des valeurs très conservatrices du frottement latéral et de la résistance en pointe, voire même en ignorant la résistance en pointe pour les pieux flottants.

D'une façon générale, un contrôle de la portance est systématiquement demandé pour les projets où des pieux vibrofoncés définitifs ont un rôle porteur. Dans la très grande majorité des cas, un surbattage est exigé. Le contrôle de la portance est alors réalisé par l'intermédiaire d'une formule de battage ou une instrumentation dynamique. Parfois des essais de chargement statiques sont demandés pour établir la capacité portante réelle des pieux vibrofoncés. Dans les chantiers comportant un grand nombre de pieux, le gain de productivité atteint avec le vibrofonçage doit être mis en regard du coût des essais de chargement statiques et/ou dynamiques.

En France, la portance des pieux ou éléments mis en place dans les sols est appréciée à partir de méthodes semi-empiriques basées sur des expérimentations bien documentées. Il apparaît donc que la réponse à la question posée ne peut valablement être basée que sur des résultats d'expérimentations faites dans le même esprit. Le Projet National se propose donc d'ajouter quelques éléments à ceux déjà connus sur ce problème, qui ne sont trop peu nombreux dans le monde.

3.4. Suivi de paramètres en cours de fonçage

Dans l'appréciation de la portance, il y a aussi un problème de contrôle de la qualité. Il ne sert à rien de s'appuyer sur une réglementation bien documentée pour définir les caractéristiques d'une couche portante, si l'on prend en compte une fiche de 5m dans cette couche alors qu'elle n'est en réalité que de 1,5m. On remarquera que le suivi de paramètres au cours d'un fonçage par vibrations, par exemple le contrôle de la vitesse moyenne de pénétration, de la force de retenue, de la puissance consommée en fonction de la profondeur atteinte, apporte à cet égard une assurance sur la portance des éléments mis en place qui vaut bien celle que peut donner un bon suivi de battage. Il resterait à généraliser ces bonnes pratiques lorsque l'on veut faire jouer à des éléments vibrofoncés un rôle porteur.

4. Apport des expérimentations : exemple des essais de Montoir

A l'occasion du prolongement du Terminal à Marchandises Diverses et à Conteneurs (TDMC 4) du port de Montoir (Port Autonome de Nantes-Saint-Nazaire), il a été décidé de réaliser un plot d'essai dans le cadre du Projet National Vibrofonçage (Borel et al., 2002).

Les essais avaient pour but principal d'observer le comportement réel des pieux vibrofoncés dans les terrains du port qui sont constitués d'alluvions sablo-argileuses et d'argiles vasardes. Les essais ont consisté à mettre en place deux tubes métalliques Ø339 mm, l'un des tubes étant entièrement vibrofoncé, l'autre étant vibrofoncé puis surbattu sur son dernier mètre de fiche. Les tubes étaient instrumentés de façon à mesurer lors des différentes phases de leur installation les accélérations et les déformations en tête et en pied. Le pieu entièrement vibrofoncé a été soumis à un essai de chargement statique instrumenté.

On peut se reporter aux actes de la conférence Transvib 2002 (Borel et al., 2002) pour plus d'information sur ces essais qui ont fait l'objet d'un concours de prévision à l'aveugle (Vanden Berghe, 2002).

4.1. Contexte géotechnique

A proximité immédiate des pieux d'essai, les reconnaissances géotechniques ont comporté un profil pressiométrique, un profil CPT, un profil SPT et un sondage carotté Ø90 mm avec prélèvement d'échantillons pour essais en laboratoire. Le tableau 2 présente les caractéristiques moyennes des terrains mis en évidence par la reconnaissance.

4.2. Installation et équipement

Les pieux ont été vibrofoncés 30 août 2001 à l'aide d'un vibreur ICE 815 (figure 2 et tableau 3) en un tronçon de 31 m de longueur. Les pieux étaient constitués d'un tube de diamètre Ø339 mm et d'épaisseur $e = 14$ mm.

Durant le vibrofonçage, une instrumentation a été mise en place afin de mesurer :

- la vitesse d'enfoncement ;
- l'accélération et les efforts en tête et en pointe ;
- la force de traction appliquée par la grue ;
- les vibrations transmises au sol.

Tableau 2. Caractéristiques géotechniques – site de Montoir

	prof. /TN	cote		p_l^* (MPa)	E_M (MPa)	SPT (N)	q_c (MPa)	FR
1	0 m à 4,5 m	+7,5 CM à +3 CM	sable grossier beige	1,0	10	18	2 à 16	<0,5%
2	4,5 m à 8,5 m	+3 CM à -1 CM	sable gris-noir	1,0	7	7 à 17	10 à 18	<0,5%
3	8,5 m à 10 m	-1 CM à -2,5 CM	blocs et cailloux					
4	10 m à 13 m	-2,5 CM à -5,5 CM	sable grossier et fin légèrement argileux	0,6	5	7 à 16	3 (pic 10)	1%
5	13 m à 22,5 m	-5,5 CM à -15 CM	alternance de sable grossier et fin et de lentilles décimétriques d'argile gris-noir	0,8	6,5	4 à 16	1,5 (argile) 6 à 18 (sable)	2 à 4% 1 %
6	22,5 m à 36 m	-15 CM à -28,5 CM	alternance de lentilles millimétriques de sable fin et d'argile vasarde gris-noir (jalle)	0,7	5	1 à 10	1,75 (pic 8 à 12)	2 %

La vitesse d'enfoncement a été calculée à partir d'un enregistrement vidéo, les pieux étant marqués tous les 10 cm par de la peinture blanche (figure 2). Chacun des tubes était instrumenté avec des accéléromètres et des jauges de déformations positionnées en tête et en pied, sur deux sections diamétralement opposées. La force de traction était mesurée au moyen de jauges de contraintes collées sur le crochet de la grue. Les capteurs étaient reliés à une centrale d'acquisition avec une fréquence d'acquisition de 1200 Hz. Les vibrations transmises au sol ont été mesurées au moyen de trois géophones placés à 6, 12 et 18 m de l'axe des pieux.

Comme indiqué sur la figure 3, les capteurs et les câbles étaient protégés par des cornières soudées sur les tubes. En complément, deux tubes-logements en acier de Ø50/60 mm ont été soudés sur les génératrices extérieures afin de recevoir 2 chapelets d'extensomètres amovibles LPC. Les tubes étaient fermés en pointe par des sabots destinés à protéger l'instrumentation et dont la section était supérieure à la section nominale du tube.

Tableau 3 Principales caractéristiques de l'ICE 815

fréquence maximale	1570 tpm / 26 Hz
moment d'excentricité	46 kg.m
force centrifuge	1250 kN

amplitude maximale	20 mm
poids total	7700 kg
puissance maximale du groupe	384 kW / 522 HP

Le premier pieu a été vibrofoncé jusqu'au refus observé pour 18,90 m de fiche. Le second pieu a été vibrofoncé jusqu'à 17,90 m, puis surbattu jusqu'à 18,90 m au moyen d'un marteau Delmag D12. Les figures 4 et 5 présentent le suivi de l'enfoncement en fonction du temps. Les relevés d'enfoncement des deux tubes vibrofoncés sont très similaires. L'enfoncement a été très rapide dans les remblais et alluvions sableuses de surface malgré une résistance pénétrométrique relativement élevée pouvant atteindre $q_c = 18$ MPa. Le vibrofonçage du tube soumis à l'essai de chargement statique a été interrompu sur ordre pour une fiche de 14 m. Après reprise du vibrofonçage, la vitesse d'enfoncement a progressivement diminué alors que le pieu atteignait un sol alternant des couches argileuses ($q_c = 1,5$ MPa et un "friction ratio" de 2% à 4%) et sableuses ($q_c = 6$ à 18 MPa et un "friction ratio" de 1%). Le vibrofonçage a été arrêté pour une fiche de 18,90 m où la vitesse d'enfoncement était de l'ordre de 10 cm/min seulement.

La fréquence du vibreur est restée relativement constante lors de la mise en place passant de 23 Hz au début à 21,5 Hz en fin d'installation.



Figure 2. Mise en fiche initiale des tubes



Figure 3. Aspect de la pointe

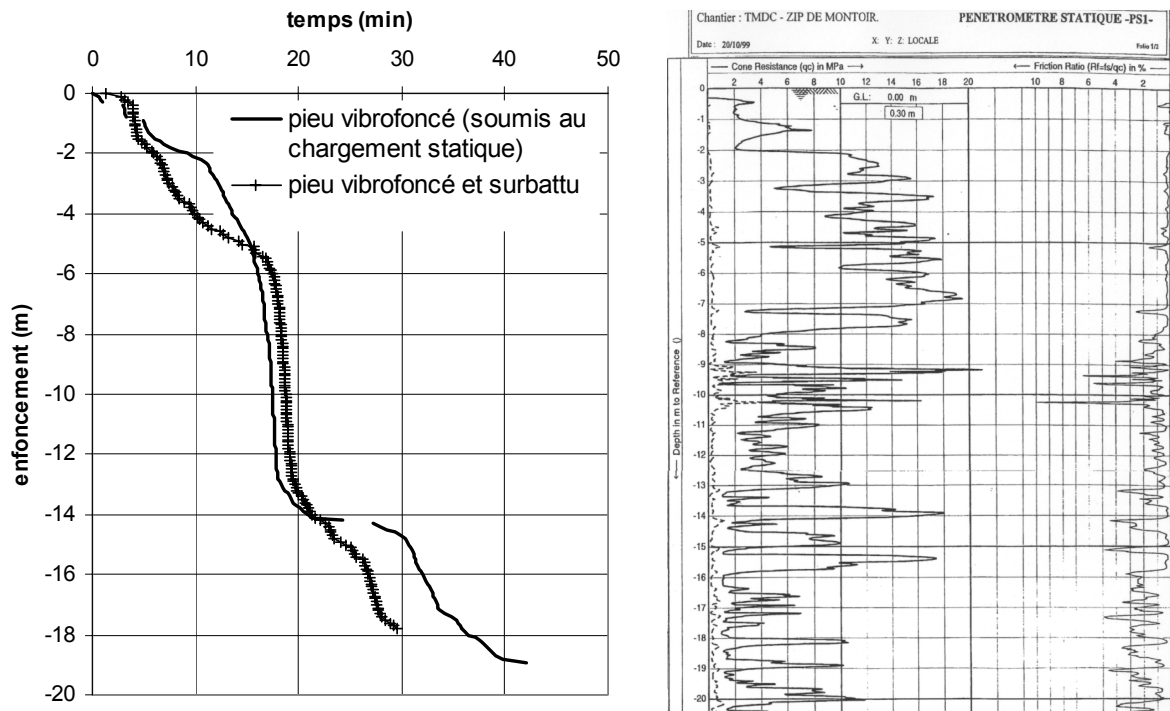


Figure 4. Relevé d'enfoncement des tubes vibrofoncés et profil pénétrométrique

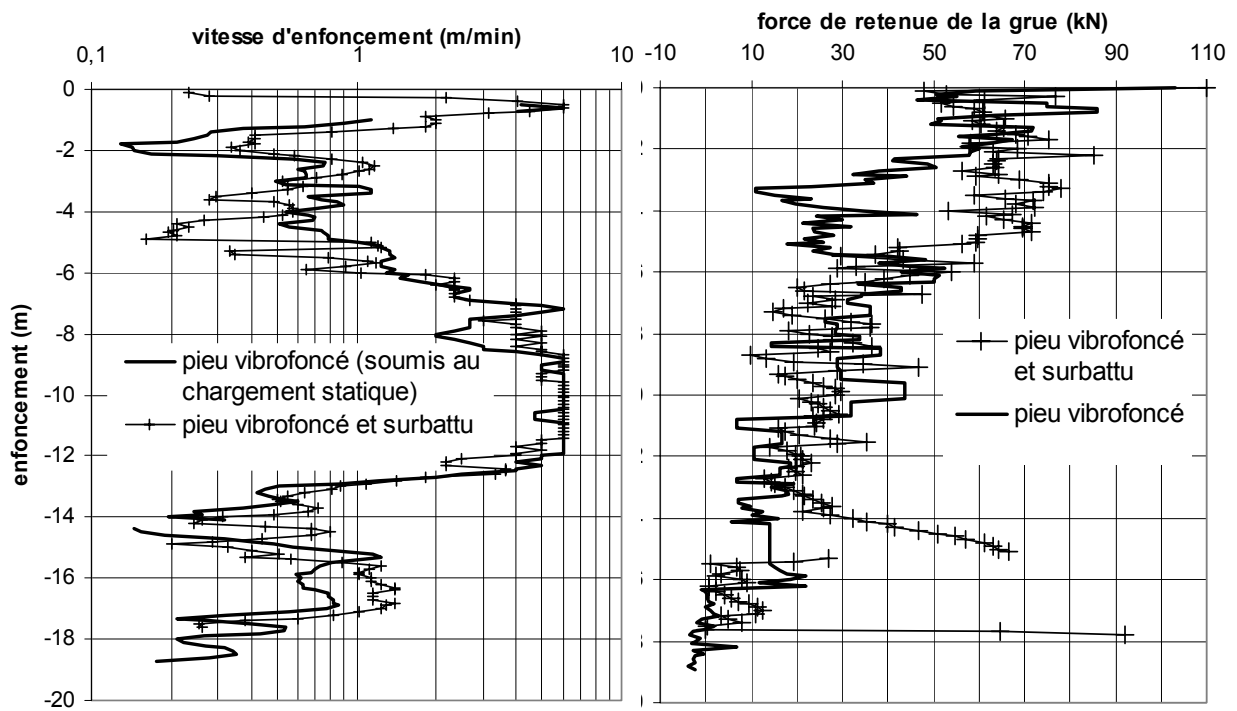


Figure 5. Vitesse d'enfoncement des tubes vibrofoncés et force de retenue de la grue

4.3. Essai de chargement statique

Seul le tube entièrement vibrofoncé à été soumis à un essai de chargement statique instrumenté (figure 6). Le pieu a été chargé après un délai de repos de 20 jours. Le programme de chargement a comporté 25 paliers de 50 kN maintenus 30 minutes chacun.

La charge limite (ou ultime) Q_u du pieu a été atteinte sous la charge maximale d'épreuve de 1,25 MN (125 t) où l'on a observé une augmentation très rapide des enfoncements après 10 minutes d'application de la charge. L'enfoncement de la tête a alors largement dépassé $1/10^{\text{ème}}$ du diamètre du pieu.



Figure 6. Dispositif en cours d'essai

L'analyse de la distribution des efforts le long du fût et de leur mobilisation a été effectuée à partir de la distribution des déformations unitaires mesurées par les extensomètres amovibles (figure 8). Pour la charge limite $Q_u = 1250$ kN, 80% de la charge est reprise par frottement latéral ($Q_s = 990$ kN) et la charge reprise en pointe vaut $Q_p = 260$ kN.

Ces mesures permettent d'isoler 3 régimes caractéristiques de mobilisation du frottement latéral qui correspondent bien aux contrastes de vitesse d'enfoncement et aux différentes couches de sol révélées par la reconnaissance (tableau 4).

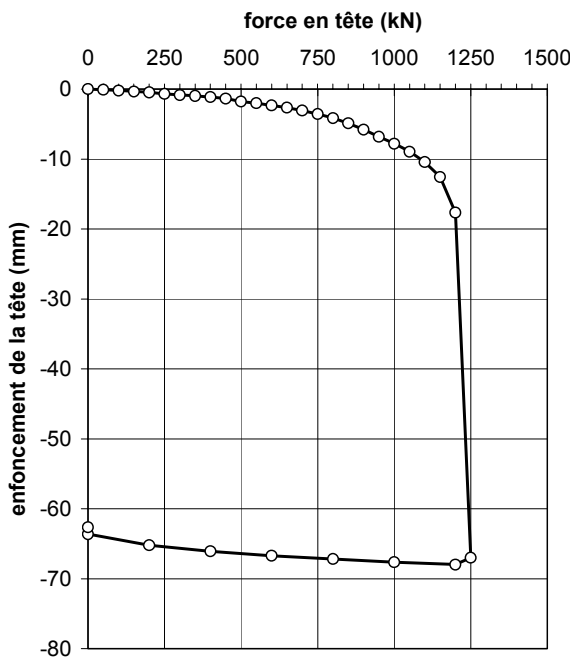


Figure 7. Courbe d'enfoncement

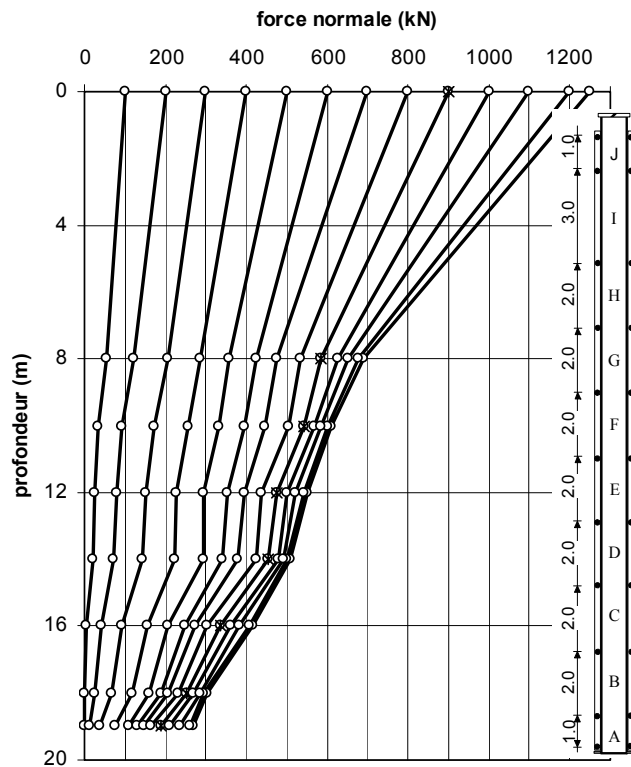


Figure 8. Distribution des efforts

Pour ce pieu vibrofoncé fermé, on a observé une résistance en pointe intermédiaire entre les valeurs préconisées par le fascicule 62 – Titre V pour les sables et pour les argiles dans le cas des pieux battus fermés. On rappelle que le sol présent en pointe est effectivement constitué d’une alternance de couches décimétriques de nature plus argileuse et plus sableuse. Par contre, le frottement latéral mesuré dans les sables du site vaut entre 50% et 75% seulement des valeurs proposées par le fascicule 62 – Titre V pour les pieux battus fermés.

Tableau 4. Frottement latéral, vitesse d'enfoncement et type de sol

	prof. /TN	cote	type de sol	vitesse d'enfoncement moyenne	vitesse d'enfoncement maximale	q _s
1	0 m à 8,5 m	+7,5 CM à -1 CM	sable grossier	0,4 m/min	1,2 m/min	45 kPa
2	8,5 m à 13,5 m	-1 CM à -6 CM	sable gris-noir légèrement argileux avec blocs	2 m/min	6 m/min	20 kPa
3	13,5 m à 18,9 m	-6 CM à -11.4 CM	sable grossier et fin avec lentilles décimétriques d'argile gris-noir	0,4 m/min	1,2 m/min	35 kPa

5. Conclusions et perspectives

Dans cette communication, on a présenté les principaux enjeux et besoins de recherche relatifs au vibrofonçage des pieux et des palplanches, auxquels le projet national souhaite apporter des réponses. Si l’on a plus particulièrement insisté sur les expérimentations sur site et les aspects liés à la capacité portante, le projet vibrofonçage comporte également des développements importants concernant la modélisation du procédé (Sieffert, 2002 ; Vié, 2002).

Le vibrofonçage est principalement utilisé pour la réalisation de rideaux de soutènement et moins fréquemment dans le domaine des fondations, sauf pour la mise en fiche initiale des pieux. Le choix d'un équipement est essentiellement basé sur l'expérience des entreprises et des constructeurs de matériel, l'utilisation de logiciels restant exceptionnelle.

Il n'y a pas de méthode établie pour calculer la portance des pieux vibrofoncés. Au stade du projet, il existe certaines pratiques qui consistent le plus souvent à assimiler les pieux vibrofoncés aux pieux battus, en prenant parfois des valeurs conservatrices du frottement latéral et de la résistance en pointe, voir même en ignorant la résistance en pointe pour les pieux flottants. Dans la pratique courante, le surbattage est exigé afin de contrôler la portance par l'intermédiaire d'une formule de battage.

Le projet national comporte ainsi une forte composante expérimentale destinée à progresser à la fois dans la connaissance de la vibrofonçabilité et de la capacité portante, avec l'instrumentation de la mise en place de pieux et profilés, suivie de leur chargement statique.

6. Références

- Borel S., Bustamante M., Gianceselli L. *Two comparative field studies of the bearing capacity of vibratory and impact driven sheet piles*. Proceedings International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction TransVib 2002, Louvain-la-Neuve, 2002
- Borel S., Gianceselli L., Durot D., Vaillant P., Barbot L., Marsset B., Lijour P. *Full-scale behavior of vibratory driven piles in Montoir*. Proceedings International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction TransVib 2002, Louvain-la-Neuve, 2002
- Briaud J.L., Coyle H.M., Tucker L. *Axial response of three vibratory and three impact-driven H piles in sand*. Modern geotechnical methods : instrumentation and vibratory hammers, TRR 1277, 136-147, 1990
- Gonin H. *Du pénétromètre dynamique au battage des pieux*. Revue Française de Géotechnique, 76, 1996
- Gonin H. *Quelques réflexions sur le vibrofonçage*. Revue Française de Géotechnique, 83, 1998
- Holeyman A. *Vibratory driving analysis – keynote lecture*. Proceedings XIth international conference on the application of stress-wave theory to piles, Sao Paulo, 16 pages, 2000
- Holeyman A., Legrand C. *Soil-structure interaction during pile vibratory driving*. Proceedings 14th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Hamburg, 2, 817-822, 1997
- Mazurkiewicz B.K. *Influence of vibration of piles on their bearing capacity*. Proceedings 1st Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Gdansk, 3, 145-153, 1975
- Mosher R.L. *Axial capacity of vibratory-driven piles versus impact-driven piles*. Modern geotechnical methods : instrumentation and vibratory hammers, TRR 1277, 128-135, 1990
- Sieffert J.-G. *Vibratory pile driving analysis – a simplified model*. Proceedings International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction TransVib 2002, Louvain-la-Neuve, 2002
- Vanden Berghe J.-F. *International prediction event of vibratory pile driving*. Proceedings International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction TransVib 2002, Louvain-la-Neuve, 2002

- Vié D. *Simple model for prediction of vibratory driving and experimental data analysis*. Proceedings International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction TransVib 2002, Louvain-la-Neuve, 2002
- Viking K. *Vibratory driven piles and sheet piles – a literature survey*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Department of civil and environmental engineering, Division of soil and rock mechanics, Report 3035, 75 pages, 1997
- Viking K. *Vibro-driveability – a field study of vibratory driven sheet piles in non cohesive soils, PhD thesis*. Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 281 pages, 2002
- Viking K., Bodare A. *Laboratory studies of dynamic shaft resistance response of a vibrodriven pile in granular soil by varying the relative density*. Proceedings 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 863-969, 1998