

Étude expérimentale du comportement d'un pieu isolé sous l'effet de sollicitations horizontales de freinage et de démarrage de circulations ferroviaires

**H. MOUSSARD
J.-F. KERSALE**

SNCF

*Direction de l'ingénierie
Département
des ouvrages d'art
6, avenue*

*François-Mitterrand
93574 La Plaine Saint-Denis
herve.moussard@sncf.fr
jean-françois.kersale@sncf.fr*

Résumé

C'est dans le but d'étudier expérimentalement le comportement d'un pieu isolé sous l'effet d'une charge latérale de courte durée équivalente à celle de l'effet du freinage d'un convoi sur un pont ferroviaire que le Département des ouvrages d'art de l'ingénierie SNCF a programmé l'exécution d'une campagne d'essais de chargement horizontaux en vraie grandeur sur des pieux de fondation d'un viaduc ferroviaire en cours de construction. Le dispositif d'essai et d'instrumentation du pieu isolé mis en œuvre dans le cadre de l'expérimentation porte uniquement sur la mesure des déplacements et des rotations en tête du pieu sous l'effet du chargement horizontal. Les résultats expérimentaux sont analysés, interprétés et confrontés aux résultats d'un calcul théorique prévisionnel basé sur la méthode de construction des courbes de réaction recommandée par le Fascicule 62-Titre V.

Mots-clés : pont ferroviaire, fondations profondes, pieu, chargement latéral de courte durée, déplacement horizontal, courbes de réaction, module de réaction horizontal.

Experimental study of the behaviour of pile foundation under the effect of railway braking lateral load

Abstract

The Department of Civil Engineering of SNCF has studied the mechanical behaviour of a single pile under horizontal loading of short duration that simulates the effect of the braking of a train on a railway bridge. Within a building project, full scale lateral tests were carried out on piles of a railway bridge under construction. The test monitoring equipment used for the single pile only focuses on the measurement of horizontal displacements and rotations of the top of the pile under the effect of the lateral load. The experimental results are analyzed and compared with the results obtained from a design method based on the reaction's curves recommended by Fascicule 62-Titre 5.

Key words: railway bridge, deep foundations, piles, short duration lateral loads, horizontal displacement, p-y curves, soil horizontal reaction modulus.

Introduction

Certaines évolutions technologiques ferroviaires de ces dernières décennies, comme l'accroissement de la vitesse commerciale des circulations ou bien encore la pose de voie en longs rails soudés, ont été accompagnées de l'émergence de nouvelles exigences fonctionnelles pour la voie ferroviaire. Ces exigences s'avèrent particulièrement contraignantes dans le cadre de la conception et du dimensionnement d'infrastructures en interaction avec la voie comme les ponts et les viaducs.

L'Union internationale des chemins de fer (UIC) a établi un certain nombre de vérifications à satisfaire pour s'assurer que sous l'effet des charges d'exploitations ferroviaires, le déplacement de l'ouvrage et de toutes les parties qui le composent, notamment ses appuis et ses fondations, ne sont pas susceptibles de remettre en cause la stabilité de la voie portée, et en conséquence la sécurité des circulations ferroviaires. Parmi les états limites à vérifier, ceux liés aux conditions de déplacement admissible de l'ouvrage et de la voie sous l'effet du freinage des circulations ferroviaires sont le plus souvent prépondérants dans le dimensionnement des appuis des ponts-rails, la réponse des appuis au déplacement sous les sollicitations horizontales étant également fortement dépendante de celle de leurs fondations.

L'appréciation du comportement des fondations sous l'action du freinage des convois constitue donc un enjeu important pour l'ingénieur dans l'approche de la conception d'un pont ferroviaire et dans l'évaluation de son aptitude fonctionnelle ainsi que celle de la voie ferroviaire portée. Et il est évident qu'une mauvaise appréciation du comportement des fondations conduira le plus souvent à des choix structuraux inadaptés soit sous-dimensionnés et conduisant au non-respect des exigences fonctionnelles de l'ouvrage, soit surdimensionnés et occasionnant, de fait, des surcoûts dans la construction de l'ouvrage. Une recherche bibliographique préalable a mis en évidence l'insuffisance, voire l'absence, de données expérimentales sur l'étude du comportement de pieu sous l'effet d'un chargement horizontal de courte durée comparable à celui du freinage d'un convoi ferroviaire (Ambrosino, Bru et Ledoux, 1973 ; Bouafia, 1990 ; Moussard, 2007 ; Remaud, 1999).

C'est dans le but d'étudier expérimentalement le comportement d'un pieu isolé sous l'effet d'une charge horizontale de courte durée comparable à celle du freinage d'un convoi ferroviaire, mais aussi de confronter les résultats expérimentaux ainsi obtenus aux pratiques réglementaires de calculs que le Département des ouvrages d'art de l'ingénierie SNCF a programmé l'exécution d'une campagne d'essais de chargement en vraie grandeur sur des pieux de fondation d'un viaduc ferroviaire en cours de construction.

L'objectif principal de l'étude expérimentale a été d'évaluer l'influence d'une mise en charge rapide en tête d'un pieu isolé en appréciant les déplacements et les rotations résultants au même niveau. Cet article présente les principaux résultats expérimentaux issus de la démarche de recherche. Dans un premier temps, nous exposons la problématique spécifique relative à la conception et au dimensionnement des ponts-rails et aux principaux critères de stabilité d'une

voie ferroviaire en interaction avec un ouvrage d'art lorsque celle-ci est notamment soumise aux effets de freinage des circulations. La consistance du dispositif expérimental mis en œuvre ainsi que les différents protocoles de chargement des pieux adoptés pour les essais sont ensuite présentés, avant de développer l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux et leur confrontation à la démarche théorique de prédiction du comportement recommandée par le Fascicule 62-Titre V.

Principe de conception et de dimensionnement des ponts-rails sous l'action du freinage des convois ferroviaires

La conception et le dimensionnement d'un ouvrage d'art reposent essentiellement sur des règles de justification aux états limites de sécurité structurale et fonctionnelle.

S'agissant des ponts rails, les états limites d'aptitude en service de l'ouvrage sont intimement liés à ceux de la voie ferroviaire portée. Il existe une forte interaction entre la voie et le pont, traduisant d'une certaine manière les conséquences que le comportement de l'un peut avoir sur le comportement de l'autre (Fig. 1). Cette notion d'interaction voie-ouvrage est fondamentale dans l'approche du dimensionnement des appuis et des fondations d'un pont ferroviaire. Maîtriser cette interaction, c'est garantir que le pont sera toujours apte à assurer son usage : supporter la voie exploitée sans que celle-ci ne puisse être sujette à des désordres.

L'Union internationale des chemins de fer a établi un certain nombre de recommandations pour la conception et le dimensionnement des ponts-rails et autres ouvrages ou éléments d'ouvrage interférant avec la voie ferroviaire (Fiche UIC 774-3 R, 2000). En France, comme dans une majeure partie des réseaux ferroviaires étrangers, une grande partie des voies existantes est actuellement équipée de longs rails soudés (LRS), en particulier celles circulées à grande vitesse et à très grande vitesse ($v > 220$ km/h), où il ne se conçoit plus que des voies de ce type. L'évolution technologique majeure que représente la pose de longs rails soudés a été accompagnée de l'émergence de nouvelles exigences sur la stabilité de la voie, notamment lorsque cette dernière est amenée à franchir un ouvrage d'art tel qu'un pont-rails. La présence d'un pont-rails, réputé dilatable et déformable, crée une discontinuité mécanique dans la structure de la voie. Tout mouvement

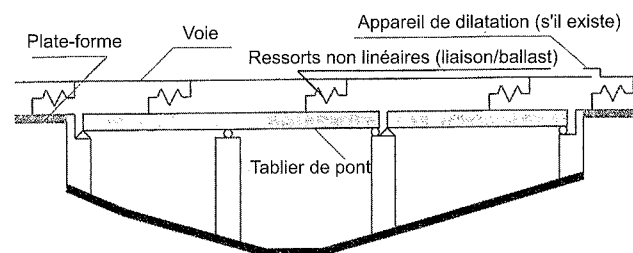


FIG. 1

Schéma structurel de l'interaction voie-ouvrage.

Structural scheme of rail-structure interaction.

de l'ouvrage, de ses appuis ou de ses fondations, est de nature à entraîner des déformations relatives de la voie ainsi que des contraintes supplémentaires dans les rails, pouvant affecter la sécurité des circulations ferroviaires.

L'effet du freinage (ou du démarrage) de convois ferroviaires sur une voie portée par un pont est modélisé comme une charge linéaire uniformément répartie et appliquée suivant l'axe longitudinal de la voie, au niveau supérieur des rails. L'intensité de la charge longitudinale est déterminée selon le type de convoi de chargement ferroviaire considéré et défini par l'Union internationale des chemins de fer (convois types UIC, SW0 et SW2 ; Référentiel SNCF IN 0032 et Eurocode 1 partie 2).

L'action de freinage est modélisée par une charge linéaire de 20 kN/ml ou 35 kN/ml applicable sur la longueur de la partie d'ouvrage chargée, dans la limite d'un effort total de 6 000 kN selon le type de convoi. L'action de démarrage est modélisée par une charge linéaire de 33 kN/ml applicable sur la longueur de la partie d'ouvrage chargée, dans la limite d'un effort total de 1 000 kN selon le type de convoi. Afin de fixer un ordre de grandeur, on considère généralement que pour les ponts dont la longueur est inférieure à 50 mètres (grande part du patrimoine des ponts ferroviaires), l'intensité des charges horizontales de freinage (ou de démarrage) d'un convoi ferroviaire est équivalente à 25 % environ des charges verticales apportées par ce même convoi.

La prise en compte de l'action du freinage et du démarrage des circulations ferroviaires sur un ouvrage d'art implique le respect de conditions de limitation de déplacement du tablier du pont particulièrement sévères pour satisfaire les exigences d'aptitude en service de la voie ferroviaire. Afin d'éviter tout endommagement ou toute altération de la voie consécutive à d'éventuels mouvements du pont-rails, notamment de ses appuis, sous l'effet du freinage et du démarrage des convois, l'UIC a fixé, selon la constitution de la voie, des états limites de service spécifiques qui se traduisent par une limitation du déplacement entre les rails et le tablier sous les forces de freinage et de démarrage de 5 mm lorsque la voie est continue ou dispose d'un appareil de dilatation à une seule extrémité de l'ouvrage, et de 30 mm lorsque la voie est équipée d'un appareil de dilatation aux deux extrémités de l'ouvrage. Ces états limites spécifiques s'avèrent être le plus souvent une condition prépondérante dans le dimensionnement des appuis des ponts-rails.

3

Présentation du site expérimental et de l'instrumentation

3.1

Le contexte du site et les pieux d'essais

Les essais de chargement ont été réalisés sur des pieux de fondation d'un viaduc ferroviaire en cours de construction. Ce viaduc, situé sur la commune de Livry-Gargan (département de la Seine-Saint-Denis), permettant le franchissement de la route nationale RN3, a été construit de mai 2005 à juin 2006. L'expérimentation a été programmée au cours du mois de septembre 2005 lors de la phase d'exécution des fondations de l'ouvrage. Les essais de chargement ont été réalisés sur deux des pieux d'une des piles de l'ouvrage. Ces pieux, de 20 m de longueur et de 700 mm de diamètre, ont été forés tubés et bétonnés à sec.

Préalablement aux travaux de construction du viaduc ferroviaire, une importante campagne d'investigation géotechnique a été réalisée sur le site ; elle a notamment permis de mettre en évidence la présence de terrains superficiels composés de remblais aux caractéristiques mécaniques relativement homogènes jusqu'à 6 m de profondeur.

3.2

La consistance de l'instrumentation

L'objet principal de l'instrumentation mise en place a été de mesurer les déplacements et les rotations en tête des pieux d'essais sous l'effet du chargement. Seule la partie libre hors sol des pieux a été instrumentée (Fig. 2). Les déplacements en tête des pieux ont été mesurés par l'intermédiaire de capteurs potentiométriques d'une course de 100 millimètres et fixés sur des potences en aluminium rigide et réglables. Les appuis des potences ont été scellés dans des plots en béton, ancrés dans le sol et positionnés à une distance suffisamment éloignée des pieux d'essais (environ 2 mètres) pour qu'ils ne soient pas perturbés par le déplacement de ces derniers.

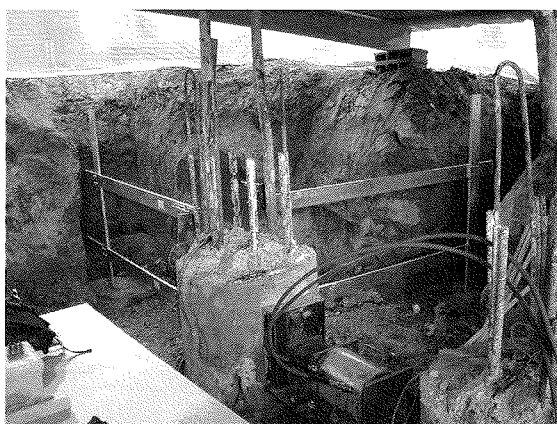
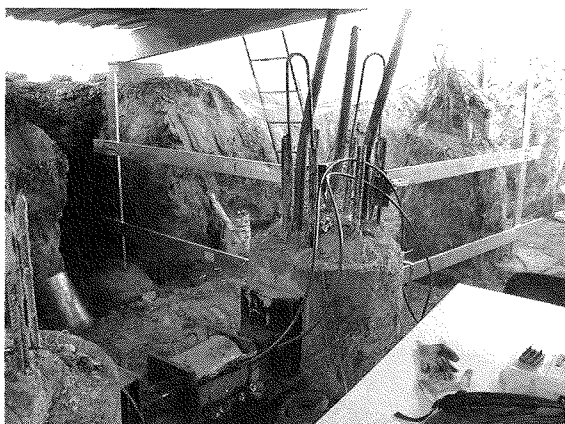


FIG. 2 Photographie de l'aire d'essai.
Pictures of experimentation site.

Chaque pieu a été équipé de quatre capteurs de déplacement, dont deux ont été positionnés dans le plan horizontal d'application de l'effort, l'un dans l'axe de l'effort, l'autre dans l'axe perpendiculaire, et deux autres à 50 cm au-dessus de ce plan suivant les mêmes axes (Figs. 3 et 4).

Chaque tête de pieu a été également équipée d'un inclinomètre axial permettant de mesurer l'évolution des rotations au cours de l'application du chargement, suivant deux axes : l'un dans le sens de l'effort, l'autre dans le sens perpendiculaire à l'effort (Fig. 5).

La charge transversale a été appliquée au moyen d'un vérin à double effet de 1 000 kN de capacité et de 150 mm de course, et prenant appui simultanément sur les deux pieux d'essais. La charge appliquée sur chaque pieu a été mesurée par l'intermédiaire de cales dynamométriques disposées entre le vérin et chacun des pieux (Fig. 6).

Les mesures ont été enregistrées en temps réel à l'aide d'une centrale d'acquisition de données pilotée par ordinateur, dotée d'une capacité d'enregistrement de 24 voies de mesures, et permettant l'acquisition de données à la seconde.

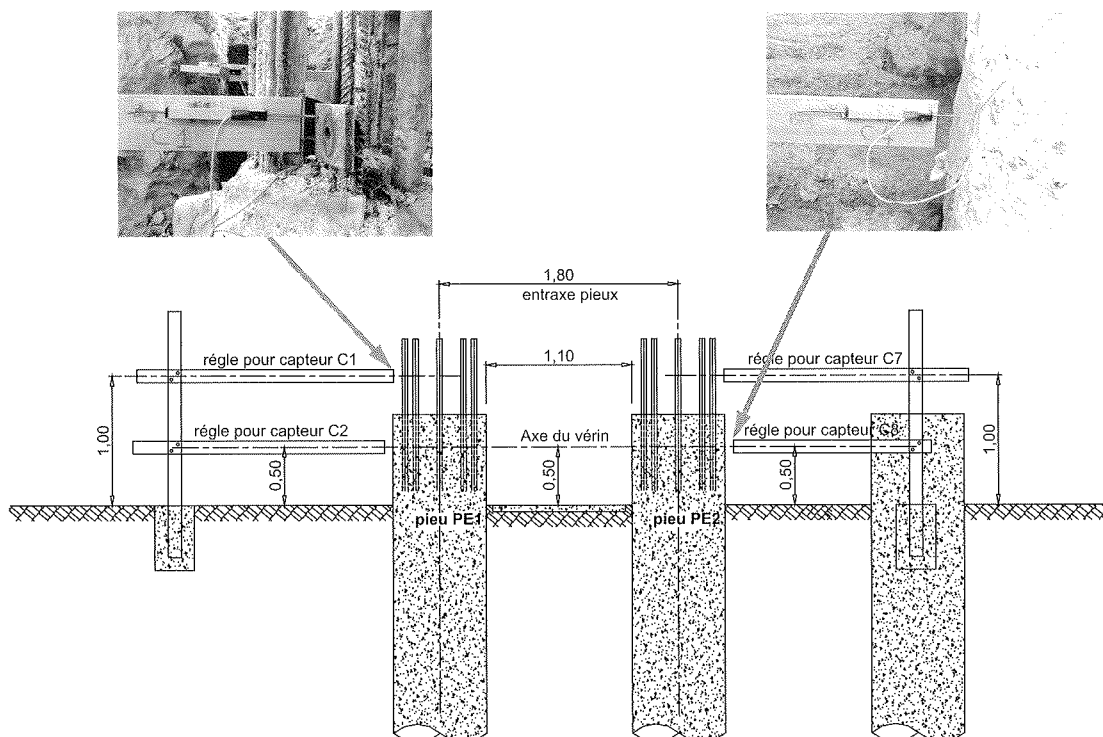


FIG. 3 Plan en profil des pieux d'essais et vue des capteurs de déplacement.
Disposition of experimental piles and view of displacement transducers.

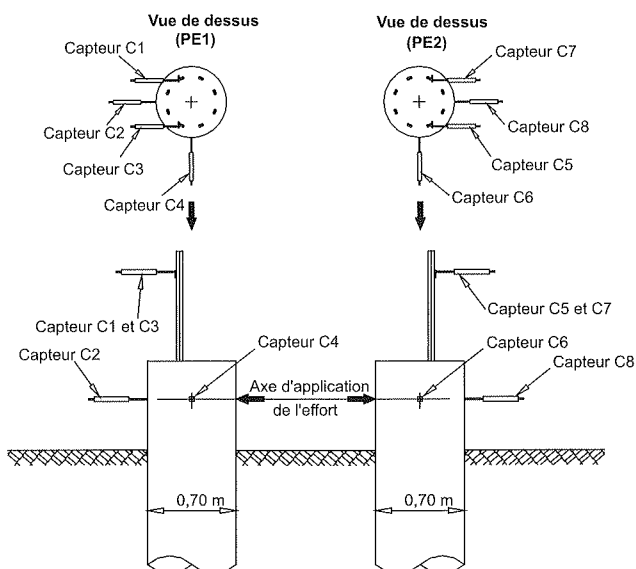


FIG. 4 Disposition des capteurs de déplacement (vue en élévation et vue de dessus).
Disposition of displacement transducers (view in elevation and from above).



FIG. 5 Photographie d'un inclinomètre.
Picture of an inclinometer.

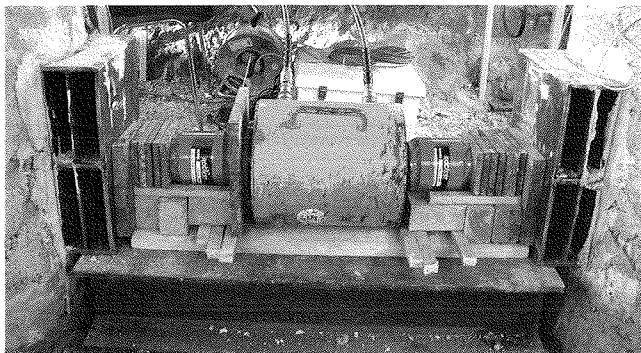


FIG. 6 Photographie du dispositif de chargement.
Picture of a loading setup.

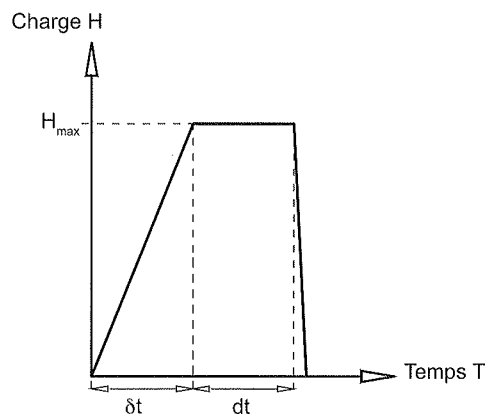
3.2

Les protocoles de chargement d'essai

L'objet de l'expérimentation en vraie grandeur ayant pour but d'étudier le comportement d'un pieu isolé sous l'effet de charges latérales comparables à celles du freinage des convois ferroviaires, le programme de chargement des pieux a été essentiellement orienté sur l'exécution d'essais de courte durée à mise en charge rapide. Afin de ne pas endommager les pieux de l'ouvrage définitif, la charge maximale d'essai a été limitée à un niveau de chargement de 200 kN, tel que le déplacement maximal du pieu soumis à la sollicitation latérale ne dépasse pas une amplitude équivalente à 1 % du diamètre nominal du pieu, soit 7 millimètres.

Dix-huit essais de courte durée à mise en charge rapide (symbole TCD) ont été réalisés suivant un programme de chargement dont le temps de mise en charge (δt) a été compris entre 15 secondes et 10 minutes. Selon le temps de montée en charge, les paliers de chargement ont été maintenus entre 30 à 60 secondes, et la phase de déchargement a été assurée instantanément. L'exercice a été mené à différents niveaux de sollicitation : 50, 100, 150 et 200 kN.

Le tableau I et la figure 7 précisent le principe du protocole de chargement de ce type d'essai. Deux essais statiques de courte durée à mise en charge par paliers (symbole CD) ont été réalisés suivant un programme de chargement – déchargement s'inspirant du principe protocolaire de la norme relative aux essais statiques de pieu isolé sous effort transversal (NF P 94-151). L'effort transversal a été appliqué progressivement en tête du pieu par incréments de charge $\Delta H = H_i/H_{\max}$. Les paliers de chargement ont été maintenus constants pendant une durée dt . La phase de déchargement a été assurée avec un seul palier maintenu pendant une durée de 0,5 dt . Le tableau II et la figure 8 précisent le principe du protocole de chargement de ce type d'essai.



avec

$H_{\max}$: effort maximal appliqué en tête de pieu

dt : durée d'un palier de charge

δt : durée d'application de l'incrément de charge

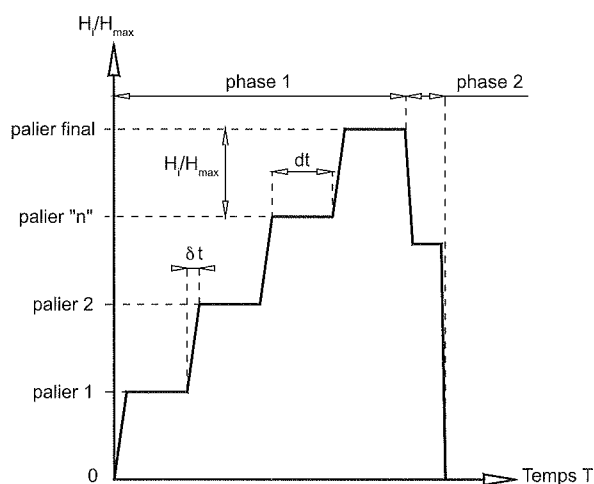
FIG. 7 Protocole des essais de chargement de courte durée à mise en charge rapide.
Protocol for tests with quick loading of short-duration.

TABLEAU I Essais de chargement de courte durée à mise en charge rapide.
Tests with quick loading of short-duration

Intitulé de l'essai	Temps de montée en charge	Charge maximale $H_{\max}$	Protocole de chargement
TCD1a TCD1b	15 sec	50 kN	montée en charge à 50 kN en 15 sec
TCD2a TCD2b	30 sec	100 kN	montée en charge à 100 kN en 30 sec
TCD3	1 min 30 sec		montée en charge à 100 kN en 1 min 30 sec
TCD4	3 min		montée en charge à 100 kN en 3 min
TCD5	1 min	150 kN	montée en charge à 150 kN en 1 min
TCD6	1 minute 30 sec		montée en charge à 150 kN en 1 min 30 sec
TCD7	3 min		montée en charge à 150 kN en 3 min
TCD8	5 min		montée en charge à 150 kN en 5 min
TCD9	10 min		montée en charge à 150 kN en 10 min
TCD10	1 min 10 sec	200 kN	montée en charge à 200 kN en 1 min 10 sec
TCD11a TCD11b	1 min 30 sec		montée en charge à 200 kN en 1 min 30 sec
TCD12a TCD12b	3 min		montée en charge à 200 kN en 3 min
TCD13	5 min		montée en charge à 200 kN en 5 min
TCD14	10 min		montée en charge à 200 kN en 10 min

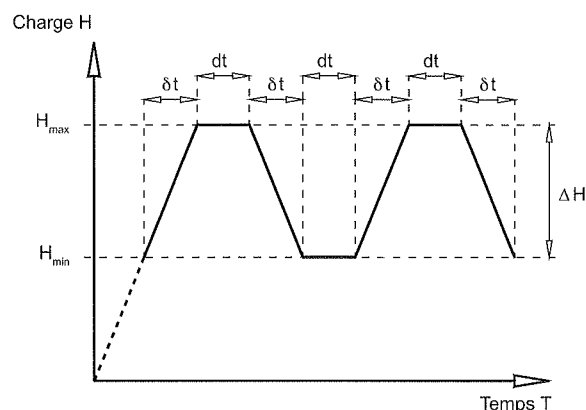
TABEAU II Essais de chargement de courte durée à mise en charge par paliers.
Tests with step loading of short-duration.

Intitulé de l'essai	Temps de mise en charge	Charge maximale $H_{\max}$	Protocole de chargement
CD1	2 h 30 min	200 kN	4 paliers de 30 minutes avec $H_i/H_{\max} = 50$ kN
CD2	7 h	200 kN	12 paliers de 30 minutes avec $H_i/H_{\max} = 16,6$ kN



avec
 H : effort horizontal appliqué en tête de pieu
 $H_{\max}$: effort maximal appliqué en tête de pieu
 $H_i/H_{\max}$: incrément de charge de $H_i/H_{\max}$
 dt : durée d'un palier de charge
 δt : durée d'application de l'incrément de charge

FIG. 8 Protocole des essais de chargement de courte durée à mise en charge par paliers.
Protocol for tests with step loading of short-duration.



avec
 $H_{\max}$: effort maximal appliqué en tête de pieu
 $H_{\min}$: effort maximal appliqué en tête de pieu
 ΔH : amplitude de la charge cyclique
 dt : durée d'un palier de charge
 δt : durée d'application de l'incrément de charge

FIG. 9 Protocole des essais de chargement cyclique.
Protocol for cyclic loading tests.

Deux essais de chargement cyclique ont été réalisés entre deux niveaux de charge basse et haute, notées respectivement $H_{\min}$ et $H_{\max}$, appliquées de manière « non alternées », toujours dans le même sens. Les phases de chargement et de déchargement ont été réalisées sous une durée δt . Les paliers de charges $H_{\max}$ et $H_{\min}$ ont été maintenus pendant une durée dt . Le tableau III et la figure 9 précisent le principe du protocole de chargement des essais cycliques.

4

Résultats expérimentaux

4.1

Remarques préalables

Au cours de la campagne, les pieux ont été soumis à une série de chargements très rapprochés dans

TABEAU III Essais de chargement cyclique.
Cyclic loading tests.

Intitulé de l'essai	Temps d'essai	Charge minimale $H_{\min}$	Charge maximale $H_{\max}$	Protocole de chargement
CCD1	1 h	67 kN	133 kN	30 cycles $H_{\min}/H_{\max}$ de 2 min ($\delta t = dt = 30$ sec)
CCD2	3 h 30 min	133 kN	200 kN	100 cycles $H_{\min}/H_{\max}$ de 2 min ($\delta t = dt = 30$ sec)

le temps. L'enregistrement des mesures a mis en évidence que l'enchaînement des chargements ne permettait pas aux pieux de retrouver leur position initiale à la fin de chaque essai, ni même la position initiale qu'ils avaient avant toute mise en charge. L'exploitation de l'ensemble des données expérimentales a donc dû tenir compte du court temps de relaxation des pieux. Certains résultats d'essais n'ont pu être exploités.

Une autre constatation importante a été relevée au cours de la campagne d'essais : la très nette différence de comportement systématiquement observée entre les deux pieux d'essais lors de leur mise en charge. A niveau de charge équivalent, le déplacement du pieu PE2 étant globalement deux fois moins important que celui du pieu PE1. Cette tendance a été observée sur l'ensemble des essais de chargement et a été attribuée à l'effet de « parasitage » provoqué par la présence d'un autre pieu à proximité du pieu PE2 (Fig. 10). Le pieu PE3 n'étant pas soumis au chargement d'essai, il est vraisemblable que la déformation du sol a été empêchée à la périphérie du pieu PE2 à cause de la

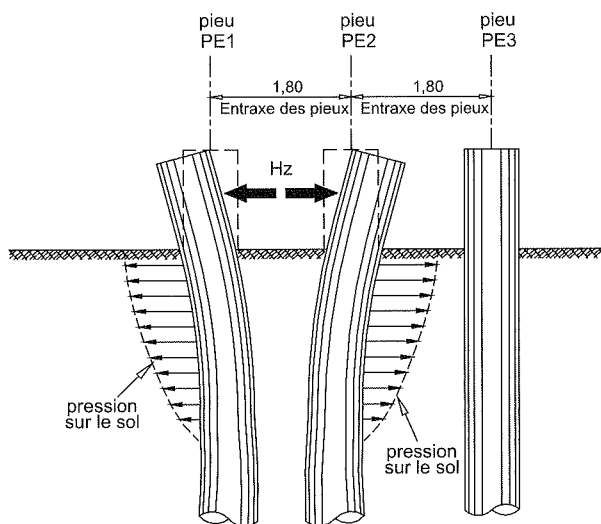


FIG. 10 Schéma de principe de mise en charge des pieux : présence « parasite » du pieu PE3.
Scheme of pile loading : presence of « parasite » in pile PE3.

proximité du pieu PE3 resté statique, conférant ainsi une raideur du sol plus importante dans cette zone. Seules les données de chargement « non parasitées » sur le pieu PE1 ont donc été exploitées dans le cadre de la recherche expérimentale.

Sur l'ensemble des essais de chargement, l'interprétation conjointe des mesures aux inclinomètres et aux comparateurs a mis en évidence que l'application de l'effort transversal s'est traduit, en tête des pieux,

par un mouvement composé d'une translation et d'une rotation. Une bonne concordance entre les déplacements mesurés aux comparateurs et la rotation évaluée à l'inclinomètre a été également mise en évidence.

4.2

Comportement des pieux lors des essais de chargement de courte durée

L'analyse du comportement expérimental des pieux d'essais soumis à une charge latérale de courte durée s'est faite sur la base, d'une part des essais de chargement à mise en charge par paliers (symbole CD), et d'autre part aux essais de chargement à mise en charge rapide (symbole TCD). Le tableau IV présente, pour chaque essai, les valeurs des déplacements y_1 (positif dans le sens d'application de l'effort) et des rotations θ_y et θ_x en tête des pieux et au niveau du point d'application de la charge (Fig. 11). Les valeurs ont été relevées à l'issue de la montée en charge.

Pour l'ensemble des essais de chargement de courte durée réalisés, les principaux enseignements qui ont été tirés sont les suivants :

- la linéarité des courbes d'effort-déplacement en tête de pieux (Fig. 12) ;
- un accroissement des déplacements et des rotations en tête de pieux en fonction de l'allongement de la durée de montée en charge ; la vitesse de mise en charge est apparue comme un facteur d'influence dans le comportement des pieux sous charges latérales ; cette influence a pu être notamment quantifiée par l'ex-

TABEAU IV Essais de chargement de courte durée à mise en charge rapide : déplacements et rotations mesurés en tête des pieux d'essais.

Tests with quick loading of short-duration : displacements and rotations measured on top of the experimental piles.

Nom de l'essai	Charge maximale d'essai	Temps de montée en charge	Pieu PE1			Pieu PE2		
			Déplacement y_1 (mm)	Rotation θ_{12} (°)	Rotation θ_{22} (°)	Déplacement y_1 (mm)	Rotation θ_{11} (°)	Rotation θ_{21} (°)
CD1	200 kN	7 h	6,39	0,168	0,059	3,70	0,128	0,038
CD2	200 kN	2 h 30 min	7,62	0,168	0,022	3,80	0,112	0,010
TCD1a	50 kN	15 sec	1,31	0,026	0,004	0,50	0,017	0
TCD1b			1,37	0,033	0,003	0,50	0,014	0,009
TCD2 a	100 kN	30 sec	2,41	0,060	0,010	1,00	0,028	0,001
TCD2b			2,42	0,051	0,003	1,00	0,028	0,002
TCD3	100 kN	1 min 30 sec	2,55	0,063	0,006	1,00	0,028	0,008
TCD4	100 kN	3 min	2,83	0,059	0,004	1,10	0,027	0,001
TCD5	150 kN	1 min	3,92	0,079	0,009	1,90	0,051	0,007
TCD6	150 kN	1 min 30 sec	3,95	0,087	0,005	1,90	0,041	0,010
TCD7	150 kN	3 min	3,99	0,090	0,003	1,90	0,043	0,002
TCD8	150 kN	5 min	4,36	0,103	0,007	2,10	0,049	0,014
TCD9	150 kN	10 min	4,76	0,100	0,001	2,10	0,052	0,007
TCD10	200 kN	1 min 10 sec	5,14	0,120	0,006	2,70	0,056	0,003
TCD11a	200 kN	1 min 30 sec	5,24	0,117	0,004	2,70	0,067	0,003
TCD11b			5,17	0,118	0,021	2,70	0,063	0,009
TCD12a	200 kN	3 min	5,31	0,120	0,009	2,60	0,067	0,006
TCD12b			5,43	0,117	0,015	2,70	0,067	0,009
TCD13	200 kN	5 min	5,51	0,126	0,005	2,80	0,067	0,008
TCD14	200 kN	10 min	5,90	0,131	0,002	2,80	0,069	0,004

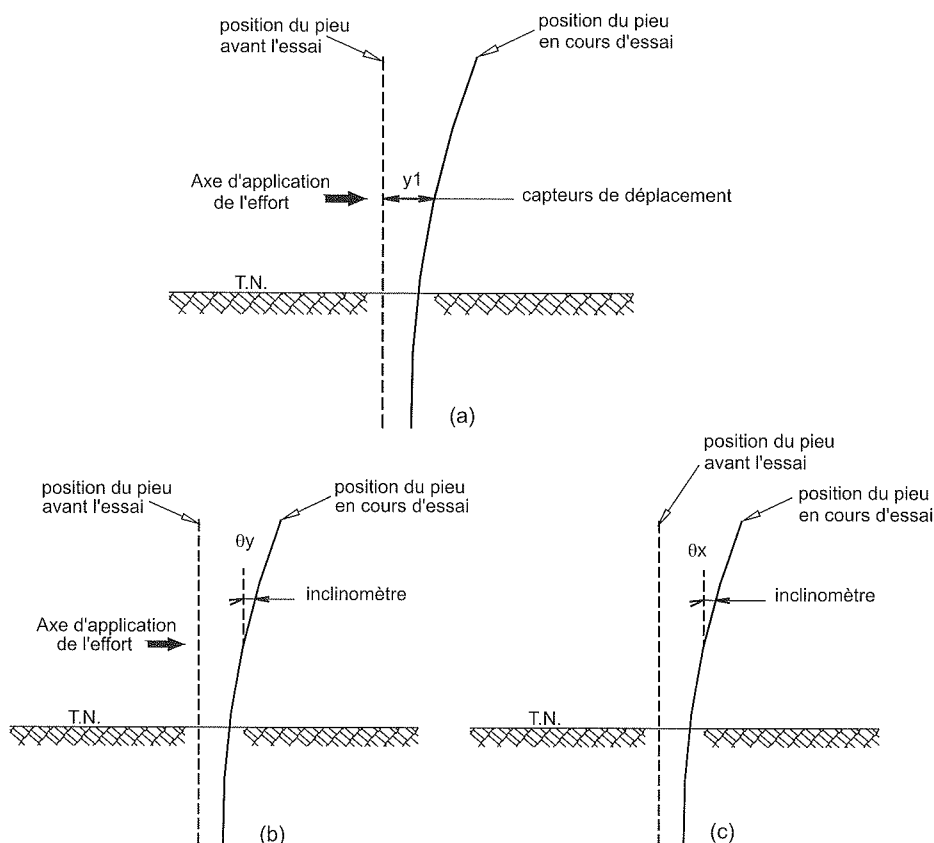


FIG. 11 Disposition des capteurs de déplacement et inclinomètres. Vue en élévation : (a) capteur de déplacement dans le sens de l'effort ; (b) inclinomètre dans le sens de l'effort ; (c) inclinomètre dans le sens perpendiculaire à l'effort.

Disposition of displacement transducers and inclinometers. View in elevation : (a) displacement transducer in the direction of force ; (b) inclinometer in the direction of force ; (c) inclinometer in the direction perpendicular to the force.

pression de raideurs « globales » du système sol-pieu, variables selon le niveau de sollicitation maximale et le temps de montée en charge ;

– à niveau de charge maximale équivalent, le déplacement de la tête des pieux est moins important sous l'effet d'un effort de courte durée à mise en charge rapide (1 minute) que sous l'effet d'un effort de courte durée mise en charge par paliers de plus longue durée (plusieurs heures).

Le système sol-pieu PE1 est donc apparu plus raide pour des sollicitations de courte durée à mise en charge rapide, et il l'a été d'autant plus que la montée en charge fut rapide ; des variations de la raideur du système sol-pieu de l'ordre de 25 % ont été constatées, les déplacements du pieu étant environ 1,25 fois supérieurs pour des temps de mise en charge de plusieurs heures. On peut toutefois relever que la comparaison des déplacements mesurés pour les essais de chargement par paliers (CD1 et CD2) ne vérifie pas totalement ces enseignements expérimentaux. Le fait que l'essai CD2 ait été le premier essai de mise en charge de la campagne peut néanmoins être une explication à cette différence de comportement ; l'essai CD1 étant, quant à lui, réalisé au cours des journées d'essais qui suivirent après qu'un grand nombre de mise en charge ait été effectué. A titre d'exemple, les courbes d'effort-déplacement des essais de chargement à 200 kN appliqué par paliers (courbe CD) et à mise en charge rapide (courbe TCD), pour le pieu PE1, sont représentées sur la figure 12.

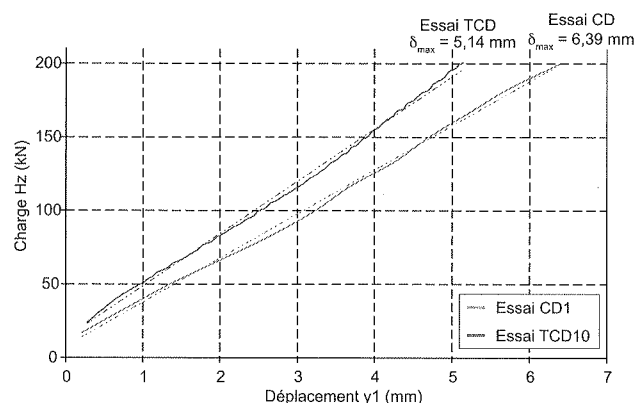


FIG. 12 Courbes effort/déplacement du pieu PE1. Essais CD1 et TCD10.
Force/displacement curves. Tests CD1 and TCD10.

4.3

Comportement des pieux lors des essais de chargement cyclique

Les deux essais de chargement cyclique ont été réalisés afin de confronter de manière relative et sommaire leurs résultats à ceux obtenus lors des essais de courte durée pour des niveaux de charge maximale équivalents.

L'exécution de ces essais a permis de dégager un certain nombre d'enseignements :

- l'effet prépondérant des premiers cycles de chargement sur le déplacement des pieux ; une forte augmentation du déplacement en tête de pieu a été constatée dès l'application des premiers cycles (< 5 à 10 cycles) ;
- la relative accommodation des pieux aux effets des cycles dans le temps ; le nombre de cycles appliqué étant toutefois relativement limité ;
- à un niveau de sollicitation équivalent, l'effet d'une charge horizontale cyclique est plus « nocif » que celui d'une charge horizontale statique de courte durée à mise en charge (le plus) rapide (1 minute et 10 secondes).

La figure 13 illustre les deux premiers enseignements expérimentaux cités ci-avant par l'expression de la vitesse de déplacement du pieu en fonction des cycles de chargement. Le tableau V présente, pour chaque essai cyclique, les valeurs de déplacement (y_1) en tête du pieu PE1, au premier et dernier cycle de chargement.

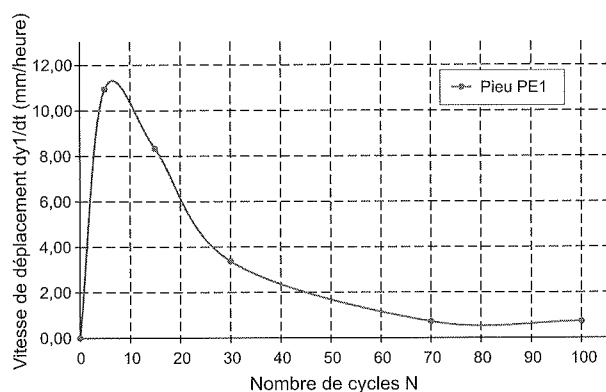


FIG. 13 Essai CCD2 – évolution de la vitesse de déplacement y_1 en tête du pieu PE1 en fonction du nombre de cycles.
Test CCD2 – evolution of displacement rate y_1 on top of pile PE1 as a function of the number of cycles.

5

Confrontation des résultats expérimentaux au calcul théorique prévisionnel

L'étude expérimentale a été également l'occasion de confronter les résultats des essais de chargement en vraie grandeur aux résultats d'une démarche de calcul théorique du comportement d'un pieu isolé sous l'effet du type de chargement considéré. Le calcul théorique a été mené suivant les pratiques réglementaires usuelles de construction des courbes de réaction proposée par Ménard et prescrites par le Fascicule 62-Titre V.

L'objectif de cette démarche de confrontation a été de voir si l'approche théorique réglementaire conduisait à prévoir correctement le comportement des pieux d'essais observé lors des différentes mises en charge expérimentales.

L'analyse comparative a été menée exclusivement sur la base des données issues des essais de chargement de courte durée (mise en charge par paliers et mise en charge rapide) et seuls les déplacements en tête de pieux, au niveau de l'application du chargement ont fait l'objet de l'analyse.

5.1

Démarche du calcul théorique prévisionnel

La modélisation prévisionnelle a été menée à l'aide du logiciel HADES, programme de calcul développé par le Centre des techniques d'ouvrages d'art du SETRA. Ce logiciel a permis la prise en compte de la réaction latérale élastoplastique du sol en fonction du déplacement des pieux. La quantité significative de sondages et essais réalisés à proximité des pieux d'essais a permis d'établir un modèle de profil géotechnique particulièrement détaillé. La figure 14 présente le profil synthétique de discrétisation des couches de sols complété des caractéristiques pressiométriques de référence qui ont été prises en compte dans la construction du modèle de calcul prévisionnel. On peut remarquer la relative homogénéité des caractéristiques sur les 6 premiers mètres de profondeur, soit environ 3 fois la longueur de transfert l_0 (longueur de transfert : $3.l_0 = 3.[4.E_p.I_p/B.E_s]^{0,25} = 6,5$ m, avec un module instantané de déformation du pieu de l'ordre de 10 000 MPa) : de 56,5 à 50,5 m NGF : $11,25 \leq E_M \leq 15,50$ MPa ; $0,56 \leq p_r^* \leq 0,75$ MPa ; $0,90 \leq p_1^* \leq 1,08$ MPa.

Considérant que le Fascicule 62-titre V assimile l'effet des efforts de freinage de convois ferroviaires à des sollicitations de « courte durée », nous avons retenu, dans le cadre de l'étude prévisionnelle, une loi d'interaction bi-linéaire (Fig. 15) à deux pentes définie par un segment de droite passant par l'origine et de pente $2.E_s$ et un palier plastique limité à la pression de fluage $P_f = B.p_r$. Pour chaque couche de sol, des courbes de réaction spécifiques et indépendantes ont été définies à partir de valeurs du module de réaction E_s exprimé en kN/m³ et défini par la formule suivante :

$$E_s = \frac{18}{4.(2,65.\frac{B}{B_0})^\alpha.\frac{B_0}{B} + 3\alpha} . E_M \text{ avec } B < B_0 \quad (1)$$

où :

E_M est le module pressiométrique (MPa) ;

α est le coefficient rhéologique du sol ;

B_0 est le diamètre de référence égal à 0,60 m ;

$B = 0,70$ m : diamètre ou largeur frontale du pieu.

TABEAU V Essais de chargement cyclique – déplacements mesurés en tête du pieu PE1.
Cyclic loading tests – displacement measured on top of pile PE1.

Essai	Temps d'essai	Nb cycles	Pieu PE1 : déplacement y_1 (mm)	
			Premier cycle	Dernier cycle
CCD1	1 heure	30 ($H_{\min} = 67$ kN ; $H_{\max} = 133$ kN)	3,75	3,90
CCD2	3 h 30 min	100 ($H_{\min} = 133$ kN ; $H_{\max} = 200$ kN)	5,94	6,72

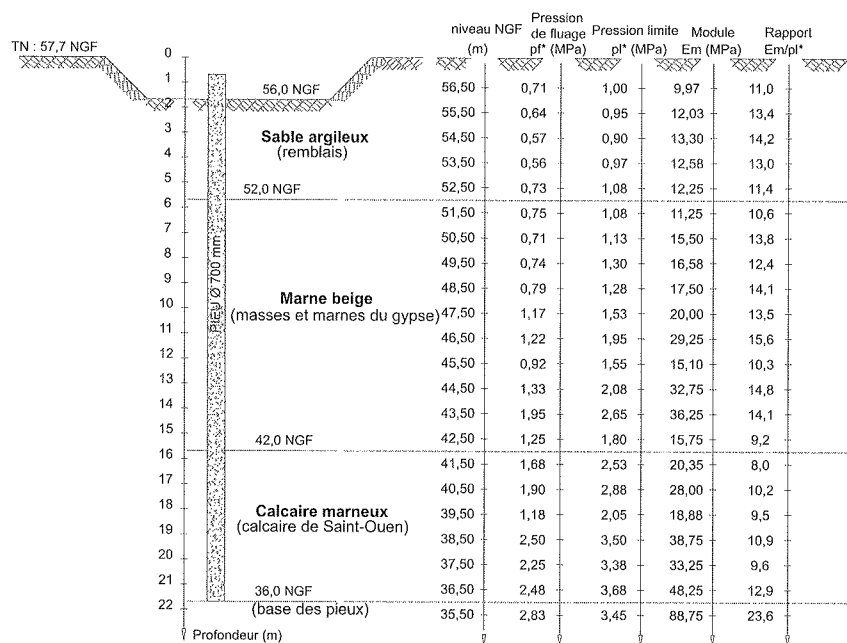


FIG. 14 Profil géotechnique synthétique de discrétisation des couches de sol; (a) discrétisation des couches de sol; (b) caractéristiques pressiométriques de référence des sols.
Synthetic geotechnical profile of soil layer discretisation; (a) discretisation of soil layers; (b) reference pressiometer characteristic of soils.

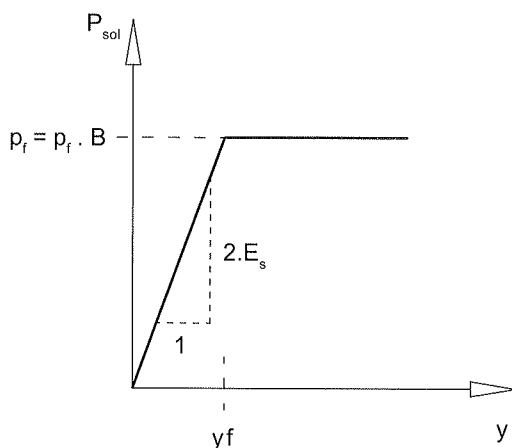


FIG. 15 Loi de mobilisation de la réaction du sol pour des sollicitations de courte durée.
Mobilisation law of soil reaction for short-duration loading.

Les valeurs de pression de fluage p_f de certaines couches ont été réduites sur les premiers mètres pour tenir compte de l'effet de surface. Le tableau VI présente les paramètres (E_s , P_f et y_f) de construction des courbes de réaction retenus pour chacune des couches considérées.

La raideur du pieu a été modélisée en considérant un module de déformation longitudinale instantanée du béton pour un chargement de type application rapide, et un module de déformation différée du béton pour un chargement de type application par paliers. L'ensemble des résultats est présenté sous la forme de courbes d'évolution des déplacements du pieu d'essai PE1 suivant la profondeur et en fonction du niveau de chargement latéral (Fig. 16).

Les courbes d'évolution du déplacement du pieu sont caractérisées par :

- une zone de mobilisation de la butée du sol jusqu'à 3,5 mètres de profondeur environ, où les déplacements du pieu sont maximaux en tête, puis dégressifs jusqu'à 3,50 m ;
- un point d'inflexion situé à 3,5 m où les déplacements sont nuls ;
- une zone de mobilisation de la contre-butée du sol entre 3,5 et 9,0 de profondeur environ, où les déplacements du pieu sont relativement faibles, et s'annulent vers 10 mètres de profondeur.

On constate que l'influence du chargement sur le pieu se dissipe très rapidement au-delà de 7 m de profondeur (environ 3.l₀) ce qui est conforme au constat usuel.

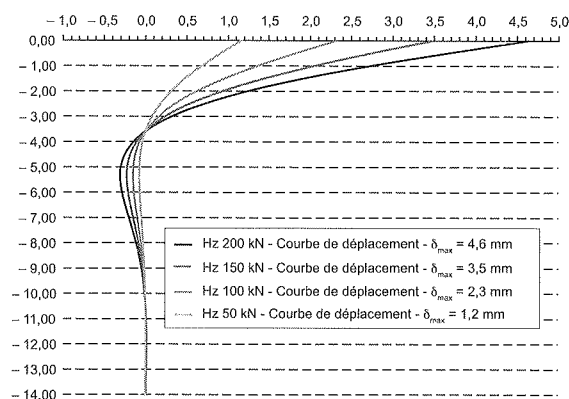


FIG. 16 Pieu PE1 – courbe d'évolution des déplacements du pieu.
Pile PE1 – displacement evolution curve of the pile.

TABLEAU VI

Paramètres de construction des courbes de réaction par couches.

Parameters used for establishing reaction curves in layers.

N° couche	Cote d'essai (NGF)	Module de réaction Courte durée $2.E_g$ (kN/m ³)	Palier de réaction de fluage $\lambda_{\phi} \cdot p_i$ (kPa)	Déplacement horizontal y_i (mm)
1	couche fictive 56,5 à 56	0	0	0
2	56 à 54	85 868	423	4,9
3	54 à 52	84 775	640	7,5
4	52 à 50	74 123	725	9,8
5	50 à 48	94 420	765	8,1
6	48 à 46	136 469	1 196	8,8
7	46 à 44	132 589	1 120	8,4
8	44 à 42	144 089	1 600	11,1
9	42 à 40	165 144	1 788	10,8
10	40 à 38	196 823	1 840	9,3
11	38 à 36	278 371	2 363	8,5
12	36 à 34	584 066	3 225	5,5

5.2

Confrontation des résultats du calcul prévisionnel aux données expérimentales

La confrontation des résultats a été menée à partir des essais de chargement de courte durée à mise en charge rapide et à mise en charge par paliers. Seul le déplacement en tête du pieu PE1, au niveau de l'application du chargement a été l'élément de comparaison. L'analyse comparative sur les essais de courte durée à mise en charge rapide a été menée pour les quatre niveaux de sollicitation : 50, 100, 150 et 200 kN. Les valeurs expérimentales de déplacements du pieu PE1 prises en compte sont celles issues des essais pour lesquelles les temps de montée en charge ont été les plus courts. Le tableau VII présente les valeurs de déplacement résultantes du calcul et des essais.

Les déplacements horizontaux en tête de pieu calculés à partir du modèle de prévision de Ménard ne sont que très légèrement sous-estimés par rapport à ceux obtenus expérimentalement. Les écarts respectifs entre le calcul et l'expérience sont au maximum de l'ordre de 15 %. Les écarts sont suffisamment faibles pour considérer que le modèle de calcul proposé par Ménard se révèle satisfaisant pour la prévision du comportement du pieu isolé PE1 pour des sollicitations de courte durée à mise en charge rapide. Ces écarts sont à l'échelle des incertitudes que l'on peut avoir sur la méthode de calcul et la détermination des paramètres tels que ceux relatifs aux caractéristiques des sols et du pieu, ou bien encore sur la discrétisation du modèle.

L'analyse comparative sur les essais de courte durée à mise en charge par paliers a quant à elle été menée à partir des deux seuls essais réalisés CD1 et CD2 à un niveau de chargement de 200 kN (respectivement 7 heures et 2 h 30 minutes de mise en charge). La confrontation a été également menée à partir des déplacements mesurés en tête du pieu PE1. Les valeurs expérimentales obtenues sont respectivement de 6,39 mm pour l'essai CD1, et de 7,62 mm pour l'essai CD2 alors que le calcul prévisionnel mené sous le logiciel HADES a donné une valeur du déplacement du pieu égale à 4,63 mm. Il est apparu donc clairement que le calcul prévisionnel a abouti à une sous-estimation assez nette des déplacements horizontaux en tête de pieu. Les écarts relatifs entre le calcul et l'expérimentation ont été de l'ordre de 38 % pour l'essai CD1 et de 65 % pour l'essai CD2. L'approche théorique réglementaire n'a donc pas pu être considérée comme satisfaisante pour la prévision du comportement du pieu isolé PE1 sous des sollicitations de courte durée à mise en charge par paliers. De plus, ces résultats ont montré que l'approche de calcul prévisionnel adoptée n'était pas sécuritaire : les déplacements calculés étant sous-évalués par rapport aux résultats expérimentaux.

On se gardera de généraliser les résultats de cette analyse comparative étant entendu qu'ils ne sont représentatifs que du caractère particulier de notre expérimentation : pieux d'essais en béton armé de diamètre 700 mm, forés tubés et bétonnés à sec dans un sol sablo-argileux avec des protocoles spécifiques de mise en charge.

TABLEAU VII

Valeurs de déplacement expérimentales et de calcul en tête du pieu PE1 pour les essais de chargement de courte durée à mise en charge rapide.

Displacement values from experiments and calculation for the top of pile PE1 during the tests with quick loading of short duration.

Charge horizontale Hz	50 kN	100 kN	150 kN	200 kN
Déplacement horizontal en tête de pieu : valeurs expérimentales	1,34 mm essai à 15 sec (TCD1)	2,42 mm essai à 30 sec (TCD2)	3,92 mm essai à 1 min (TCD5)	5,14 mm essai à 1 min (TCD10)
Déplacement horizontal en tête de pieu : valeurs calculées HADES	1,16 mm	2,32 mm	3,48 mm	4,63 mm

Cependant, il est intéressant de souligner la concordance des enseignements de notre étude avec ceux d'autres expérimentations similaires en vraie grandeur sur des pieux sollicités par des charges de courte durée (mise en charge par paliers avec des temps supérieurs à plusieurs heures). On peut citer notamment les expérimentations successives menées sur les pieux d'essais du site de Plancoët en Bretagne par Baguelin et Jézéquel en 1972 et par Hadjadji en 1993. Les résultats de celles-ci ont également mis en évidence que pour une charge horizontale statique de courte et de longue durée, les courbes de réaction P-y construites selon le Fascicule 62-Titre V étaient trop raides et conduisaient à une nette sous-estimation des déplacements horizontaux réels des pieux d'essais.

Comme Hadjadji (1993) a pu le réaliser dans le cadre de son étude expérimentale, nous avons mené une même démarche « inverse » de calcul en calant les valeurs théoriques des modules de réaction des différentes couches de sols du modèle de manière à obtenir les déplacements et rotations obtenus expérimentalement. En procédant ainsi, nous avons pu mettre en évidence qu'avec un abattement global sur les modules de réaction E_s de toutes les couches de sol, de l'ordre de 40 % pour l'essai CD1, et de 50 % pour l'essai CD2, le calcul inverse conduisait à une bonne prédiction du comportement expérimental du pieu. Autrement dit, une approximation correcte des déplacements horizontaux en tête de pieu a été obtenue en divisant par un facteur proche de 1,5 à 2 le module de réaction E_s déterminé selon l'approche du Fascicule 62-Titre V pour toutes les couches de sol du modèle.

6

Conclusion

Le principal objet de l'expérimentation en vraie grandeur ayant pour but d'apprécier le comportement d'un pieu isolé sous l'effet d'une charge latérale comparable à celle de l'effet du freinage ou démarrage de convois ferroviaires agissant les ponts-rails, l'effort expérimental a été essentiellement porté sur l'exécution d'essais de chargement de courte durée à mise en charge rapide (de 15 secondes à 10 minutes).

Pour des essais réalisés, l'analyse des résultats expérimentaux a mis en évidence que la vitesse de mise en charge était un facteur d'influence dans le comportement du pieu. A niveau de charge égal, le système sol-pieu est apparu d'autant plus raide que la sollicitation fut appliquée rapidement. Le nombre significatif d'essais réalisés a permis d'obtenir une bonne représentativité des résultats.

La confrontation des résultats expérimentaux aux démarches de calculs théoriques ont montré que pour des sollicitations latérales de courte durée, à mise en charge rapide d'une durée de l'ordre de 15 à 60 secondes, l'approche de calcul du Fascicule 62-Titre V se révélait satisfaisante dans la prévision du comportement expérimental du pieu isolé.

Pour des sollicitations latérales de courte durée et par paliers d'une durée de l'ordre de 2 à 7 heures, le calcul théorique a montré que pour prévoir de manière satisfaisante le déplacement horizontal mesuré expérimentalement en tête de pieu isolé, il était nécessaire de diviser par 1,5 à 2 la valeur du module de réaction de courte durée déterminé selon les règles du Fascicule 62-Titre V ; cet abattement sur la valeur du module de réaction de « courte durée » aboutissant par équivalence à la valeur approchée d'un module de réaction de « longue durée ».

La représentativité de ces résultats est bien évidemment limitée aux conditions expérimentales du site et à la spécificité des essais de chargement réalisés, mais ils confortent plus qu'ils ne remettent en cause la démarche usuellement adoptée pour le calcul des pieux de fondation d'ouvrage d'art soumis à des efforts de freinage et démarrage des circulations ferroviaires.

Le caractère exploratoire de notre étude expérimentale appelle nécessairement le développement de nouveaux projets de recherche orientés sur la même problématique par la multiplication des configurations d'essais (site, type de pieu, chargement...), la densification de l'instrumentation, la réalisation de nouveaux essais en vraie grandeur sur des fondations d'ouvrages ferroviaires en cours de construction ou sur modèles réduits, l'instrumentation d'ouvrages en grandeur réelle et en service.

Bibliographie

- Ambrosino R., Bru J.-P., Ledoux J.-L. – Comportement des pieux sollicités horizontalement. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 67, 1973, p. 151-167.
- Baguelin F., Jézéquel J.-F. – Étude expérimentale du comportement de pieux sollicités horizontalement. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 62, 1972, p. 129-170.
- Bouafia A. – *Modélisation des pieux chargés latéralement en centrifugeuse*. Thèse de doctorat de l'université de Nantes-École nationale supérieure de mécanique, 1990, 326 p.
- Eurocode 1 – Actions sur les structures, Partie 2 : actions sur les ponts, dues au trafic. NF EN 1991-2, 2004.
- Fascicule 62-Titre V – Règles techniques de calcul et de conception des fondations des ouvrages de génie civil, cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés de travaux. Ministère de l'Équipement du Logement et des Transports. Textes officiels, n° 93-3, 1993, 182 p.
- Fiche IUC n° 774-3 R (Union internationale des chemins de fer) – Interaction voie/ouvrage d'art, recommandations pour les calculs, 2000, 72 p.
- Hadès – Manuel d'utilisation du logiciel version 5.5b, SETRA-CTOA, août 2002.
- Hadjadji T. – *Analyse du comportement expérimental des pieux sous chargement horizontal*. Thèse de doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, 1993.
- Moussard H. – *Étude expérimentale du comportement d'un pieu isolé sous charge latérale de très courte durée, application aux fondations d'ouvrages d'art ferroviaires sollicitées par des actions de freinage*. Mémoire ingénieur CNAM Paris, 2007.
- Norme NF P 94-151 – Essai statique de pieu isolé sous effort transversal, 1993.
- Référentiel SNCF IN 0032 – Règles de conception et de calcul des ouvrages en béton, en métal ou mixtes. Cahier des prescriptions communes applicables aux marchés de travaux d'ouvrages d'art et autres constructions, 1995.
- Remaud D. – *Pieux sous charges latérales : étude expérimentale de l'effet de groupe*. Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 328 pages, 1999.