Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Le comportement des pieux de béton armé lors du battage

Autor: Glanville, W.H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2977

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

VI 3

Le comportement des pieux de béton armé lors du battage.

Das Verhalten von Eisenbeton-Pfählen während des Rammens.

Reinforced Concrete Piles During Driving.

W. H. Glanville,*
D. Sc., Ph. D., M. Inst. C. E., M. I. Struct. E.
and
G. Grime, M. Sc.,
Garston.

Introduction.

Dans Londres même et dans la région de Londres, se trouvent de nombreux emplacements de construction dont les terrains sont constitués par un sol d'origine alluviale dont la capacité portante est très faible, sur une profondeur allant de 3 à 9 mètres à partir de la surface du sol. Au-dessous, on rencontre une couche de gravier dur et compact dont l'épaisseur peut varier de 30 à 60 cm jusqu'à 6 mètres, de telles variations pouvant se manifester sur un seul et même emplacement. Au-dessous de cette couche de gravier se trouve une couche de sol comparativement tendre, présentant une faible capacité portante; enfin, à une profondeur plus grande, on trouve une argile compacte et dure. Dans l'étude des constructions qui doivent être élevées sur ces sols, et par suite des incertitudes au sujet de l'épaisseur effective de la couche de gravier, les ingénieurs ont dans de nombreux cas jugé plus prudent de pousser les fondations au-dessous du gravier, jusqu'à rencontrer la couche d'argile compacte. Le travail dans la couche de gravier est toutefois très dur et on a parfois rencontré de grandes difficultés pour le fonçage des pieux préparés à l'avance et présentant une capacité portante suffisante pour résister aux conditions sévères qui devaient leur être imposées. Les fig. 1 et 2 représentent des cas typiques de ruptures.

Avant le commencement des recherches, on ne disposait que de fort peu d'informations en ce qui concerne l'influence des conditions du fonçage sur le comportement des pieux et il n'existait aucune méthode satisfaisante pour la détermination du poids convenable du mouton, de la hauteur de chute appropriée ou de l'importance du bourrage en tête pour un pieu donné. Les règles grossières fournies par l'expérience conduisaient à des résultats qui ne donnaient pas satisfaction et il était impossible, à partir des faibles connaissances dont on disposait, de prévoir si l'on aurait probablement des difficultés ou non. Pour les ingénieurs et pour les entrepreneurs, cet état de choses était fort gênant. La «Building Research Station» fut ainsi sollicitée par la «Federation of Civil Engineering Contractors» et entreprit des investigations au sujet du comportement des pieux en béton armé, avec la collaboration de cette fédération.

* Pour le vocabulaire des expressions contenues dans les figures, voir à la fin de ce travail.

Le problème principal qui s'offrait aux recherches était par conséquent de mettre au point des méthodes permettant d'estimer le fonçage qu'un pieu donné serait susceptible de supporter sans être endommagé. Ceci comprenait 1° un examen à la fois analytique et expérimental de la nature et de l'amplitude des

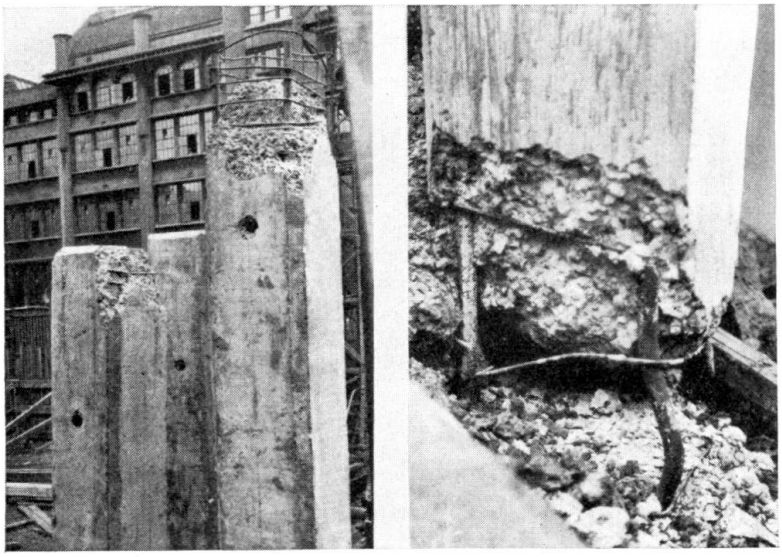

Fig. 1.
Exemples de détérioration de pieux en béton armé.

efforts produits dans les pieux par le choc des moutons, 2° une étude de l'influence des méthodes employées pour la conception et la construction des pieux, sur leur résistance à l'impact, 3° la mise au point de méthodes permettant de mettre en évidence les conditions dangereuses au cours du fonçage. Un compte-rendu complet des investigations faites sera publié sous une forme officielle par la «Building Research Station.» Un compte-rendu abrégé, plutôt d'ailleurs plus complet que celui que donne le présent rapport, a déjà été publié dans le journal de l'«Institution of Civil Engineers.»[1]

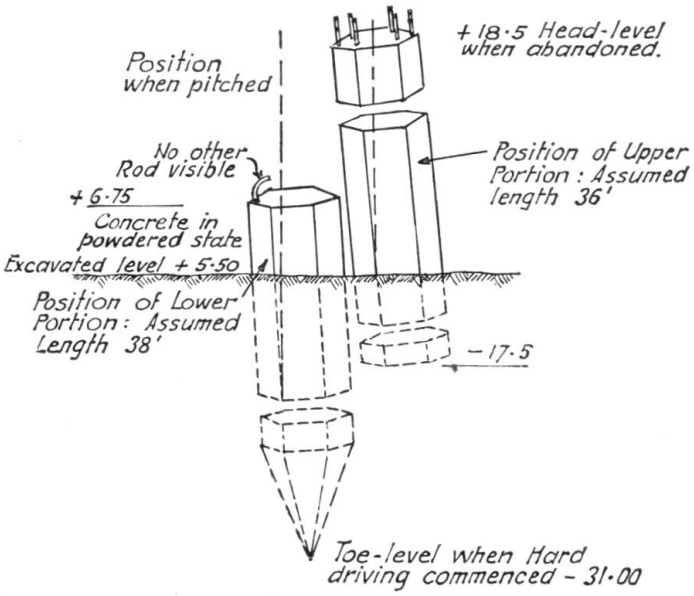

Fig. 2.
Détérioration au milieu d'un pieu.

[1] „The Behaviour of Reinforced-Concrete Piles During Driving", par *William Henry Glanville*, D. Sc., Ph. D., M. Inst. C. E., *Geoffrey Grime*, M. Sc. et *William Whitridge Davies*, B. Sc. (Ing.), Assoc. M. Inst. C. M. (J. Inst. Civ. Eng., décembre 1935).

Considérations théoriques.

Généralités.

Il est impossible, dans le cadre du présent rapport, de tenter de reproduire dans leur intégralité les études mathématiques qui ont accompagné ces investigations; pour un exposé plus complet à ce sujet, nous renverrons au journal de l'«Institution of Civil Engineers» et à la publication de la «Building Research Station.»[1]

Dès le début de l'étude de ce problème, on a compris que l'on ne pourrait aboutir à une représentation effective des conditions du fonçage des pieux que sur la base de la théorie des ondes de la propagation des efforts dans les barres élastiques. Pour faciliter l'analyse, on a fait les hypothèses suivantes:

a) Le pieu n'est pas endommagé après son fonçage.
b) Le pieu se comporte comme une barre linéairement élastique.
c) Les ondes d'efforts dans le mouton peuvent être négligées.
d) L'avant-pieu, le chapeau et le garnissage sont équivalents à un ressort qui sera désigné par la suite sous le nom de matelas et par l'intermédiaire duquel la compression est propagée instantanément.
e) La résistance au pied est élastique, la pression au pied étant proportionnelle au mouvement de descente du pied. La méthode permettant de rapporter les matelas tels qu'ils sont prévus en pratique, ainsi que les résistances au pied, à ces conditions idéales sera indiquée plus loin.

L'équation généralement applicable aux mouvements ondulatoires dans une barre mince de grande longueur, linéairement élastique, a une solution générale de la forme

$$\xi = f\left(t - \frac{x}{a}\right) + F\left(t + \frac{x}{a}\right)$$

où l'on désigne par

ξ le déplacement de la section droite à partir de sa position initiale,

t le temps (après le commencement de l'impact dans le cas présent),

x la coordonnée de toute section droite mesurée à partir d'une extrémité (la tête du pieu),

a la vitesse des ondes longitudinales dans la barre.

Cette équation indique que le déplacement de toute section droite est obtenu en additionnant deux fonctions dont la première représente une onde se déplaçant vers le bas, $f\left(t - \frac{x}{a}\right)$, et la seconde représente une onde se déplaçant vers le haut du pieu, $F\left(t - \frac{x}{a}\right)$.

Il n'y a pas d'onde se déplaçant dans la direction de bas en haut avant le moment $\frac{l}{a}$ (où l désigne la longueur du pieu), c'est-à-dire avant que la réflexion ne se produise au pied du pieu et cette onde ainsi réfléchie n'atteindra la tête du pieu qu'au bout d'un temps $t = \frac{2\,l}{a}$.

L'équation qui définit le mouvement du mouton au cours de la période initiale $0 \leqslant t < \frac{2l}{a}$ avant que l'onde réfléchie ne parvienne à la tête du pieu, admet une solution simple à partir de laquelle, à l'aide des conditions initialement indiquées, on peut déterminer la fonction f de déplacement, représentant l'onde descendante pour cet intervalle de temps. La fonction F, qui représente l'onde réfléchie remontant vers la tête du pieu, peut alors, étant donné l'hypothèse concernant la nature de la résistance en pied, être exprimée en termes de la fonction f pour une période $\frac{2l}{a}$ entérieure. Par suite, étant donné que f est connue pour l'intervalle de temps $0 \leqslant t < \frac{2l}{a}$, F sera également connue pour l'intervalle de temps $\frac{2l}{a} \leqslant t < \frac{4l}{a}$. Ce procédé permet, par application à des intervalles successifs de temps égaux à $\frac{2l}{a}$, de définir toutes les ondes qui se déplacent de bas en haut et de haut en bas du pieu à un moment choisi quelconque. En combinant les ondes en un point donné, on peut déterminer à tout instant donné t le déplacement de la section et par suite les contraintes correspondantes.

La théorie permet d'aboutir aux conclusions suivantes:

1° La distribution des efforts le long d'un pieu à un moment particulier n'est en général pas uniforme.

2° L'effort maximum en tout point du pieu augmente lorsque la rigidité du matelas augmente elle-même.

3° L'effort maximum à la tête du pieu est proportionnel à la racine carrée de la hauteur de chute du mouton.

4° Dans le cas des pieux de grande longueur ou bien dans le cas des pieux de courte longueur avec moutons légers et matelas rigides, l'effort maximum en tête du pieu dépend seulement des conditions à la tête et est le même pour tous les enfoncements. La condition nécessaire pour cela est que la valeur maximum de l'effort ondulatoire descendant le long du pieu soit atteinte avant que l'onde réfléchie n'arrive du pied.

5° L'effort maximum au pied du pieu dépend de la résistance du sol; il est nul si le pieu ne rencontre aucune résistance, ou bien il atteint une valeur égale à deux fois celle qui se manifeste à la tête du pieu si tout mouvement du pieu est entièrement empêché. Dans le premier cas, il y a réflexion à partir du pied du pieu, d'une onde de traction et dans le second cas, il y a réflexion d'une onde de compression.

Matelas de tête.

La grande influence qu'exerce le matelas de tête (avant-pieu, chapeau et garnissage), en ce qui concerne les valeurs que prennent les efforts dans le pieu, a été mise en évidence dès le début des investigations. S'il n'y avait pas de matelas entre le mouton et la tête du pieu, les efforts à la tête s'élèveraient presque instantanément jusqu'à un maximum. Le matelas de la tête du pieu diminue à la fois l'allure d'accroissement des efforts et leurs valeurs maxima. Les efforts dans la longueur du pieu subissent une influence du même ordre.

La rigidité du matelas de tête, désignée par k/A, est un facteur dont il sera

fait mention fréquemment par la suite. Si l'on considère un matelas hypothétique dans lequel les efforts et les déformations sont proportionnels, k désigne alors la constante de rigidité habituelle telle qu'elle est appliquée à des ressorts et est égal à la force nécessaire pour produire une compression égale à l'unité, c'est-à-dire que l'on a $k = E' A' / l'$, expression dans laquelle E' désigne le module de Young de l'avant-pieu, A' sa section droite et l' sa longeur. Si l'on désigne par A la section de la tête du pieu, k/A représente donc l'effort sur la tête du pieu qui est nécessaire pour produire une compression égale à l'unité et est égal au module de Young divisé par la longueur ou l'épaisseur considérée, si le matelas admet la même section que le pieu lui-même. Il varie dans le sens inverse de l'épaisseur et est indépendant de l'effort mis en jeu. La constante de rigidité pour un avant-pieu en bois dur avec un module de Young sensiblement constant peut être obtenue avec une précision suffisante à partir de cette expression. Les chapeaux et les garnissages présentent toutefois une relation non linéaire entre l'effort et la compression et la valeur convenable de k/A dépend de l'amplitude de l'effort appliqué. Il est donc alors nécessaire de spécifier k/A par rapport à un certain nombre de kg par cm².

Si l'avant-pieu et le garnissage ont des constantes effectives k_1/A et k_2/A, le k/A de l'ensemble sera donné par la relation:

$$\frac{A}{k} = \frac{A}{k_1} + \frac{A}{k_2} + \ldots + \frac{A}{k_n}$$

L'effet de matelas est principalement dû au garnissage qui se trouve au-dessous du chapeau. L'effet produit par l'avant-pieu est faible, excepté dans les cas où le garnissage a été renforcé dans des conditions telles que sa rigidité est devenue très élevée, ou bien lorsque l'avant-pieu a perdu sa dureté à l'usage. Les constantes de rigidité k/A de différents types de garnissages de tête de pieu ont été déduites des efforts enregistrés au cours du fonçage de pieux d'essai et les résultats obtenus montrent que la valeur de k/A pour les garnissages couramment utilisés dans la pratique peut être considérée comme comprise entre 28 et 1400 kg par cm² et par cm. Les valeurs aussi basses que 28 kg par cm² par cm ne s'appliquent toutefois qu'aux premiers coups frappés avec un garnissage neuf et dans la pratique, on peut appliquer les valeurs maxima et minima de 280 et de 1400 kg par cm² et par cm. L'influence de l'avant-pieu est de réduire ces valeurs à environ 265 et 1250 kg par cm² et par cm respectivement. Au cours des investigations, on n'a pas rencontré de forme de garnissage qui réponde intégralement aux exigences théoriques. Ces exigences sont les suivantes:

1° Faible rigidité, telle qu'elle est représentée par le facteur k/A.

2° Aucune augmentation de la rigidité au cours du fonçage.

3° Faible prix par rapport à la durée effective.

Conditions au pied.

Il a été indiqué que l'on avait admis du point de vue théorique que la résistance au pied était élastique. En pratique, on ne réalise la condition d'élasticité que lorsque l'enfoncement, tel qu'il est mesuré ordinairement, est nul. Dans tous

les autres cas, l'enfoncement réalisé peut être divisé en deux parties: l'enfoncement tel qu'il est mesuré ordinairement et qui sera désigné sous le nom d' «enfoncement plastique» et le mouvement élastique du sol, qui sera désigné sous le nom d'«enfoncement élastique». L'hypothèse suivant laquelle le travail effectué au pied, pour le même effort maximum, est indépendant des proportions relatives de l'enfoncement plastique et de l'enfoncement élastique, est implicite. Cette hypothèse a été contrôlée théoriquement en évaluant différents cas particuliers sur la base d'un pied purement plastique et en comparant les résultats ainsi obtenus avec ceux qui ont été obtenus dans le cas d'un pied purement élastique donnant un enfoncement égal à deux fois l'enfoncement obtenu dans le cas du pied plastique. Les résultats de la comparaison concordent convenablement.

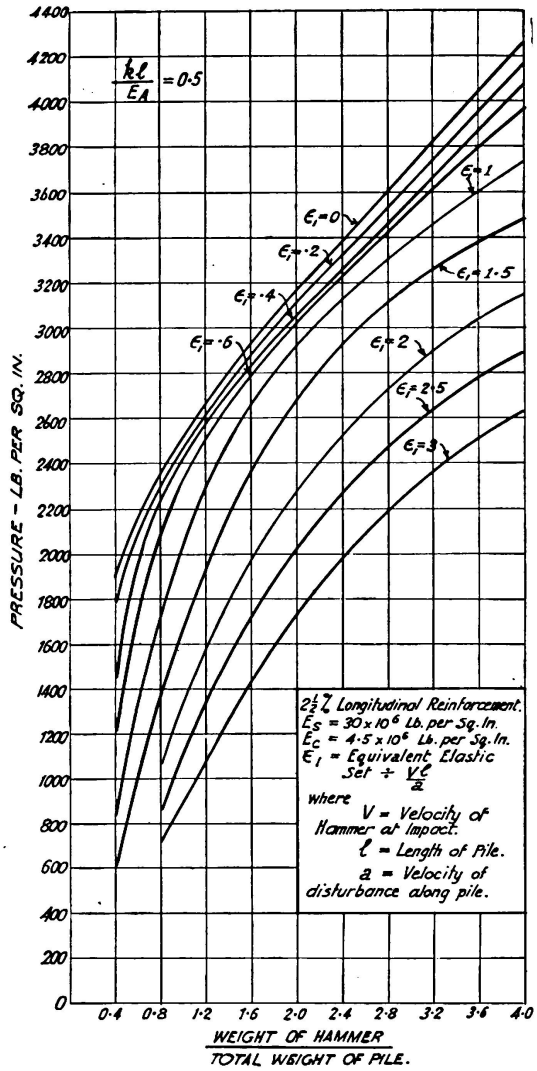

Fig. 3.
Tension maxima à la pointe du pieu pour une hauteur de chute de un pied.
(Pour une hauteur de chute de h pieds on multiplie par $\sqrt{h}$.)

La fig. 3 constitue un exemple caractéristique d'estimation des efforts maxima au pied. La série complète des chiffres ici considérés couvre une gamme de valeurs de $\frac{kl}{EA}$ allant de 0,1 à 2. Ces chiffres fournissent une limite supérieure des efforts au pied dans le cas du fonçage en terrain dur.

Description générales des appareils.

Enregistreur piézo-électrique de déformations.

L'exigence principale à laquelle doit satisfaire un appareil enregistreur, étant donné la courte durée des impulsions qui entrent en ligne de compte dans le fonçage des pieux, est que toutes les pièces mobiles possèdent une période propre

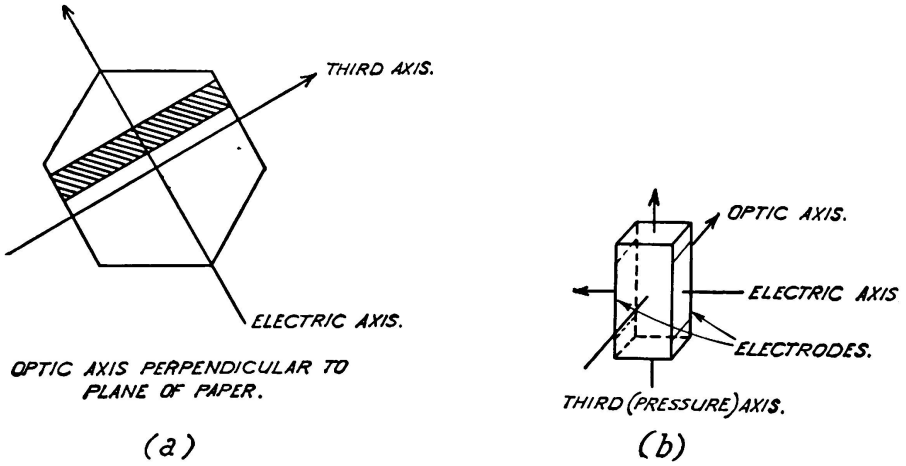

Fig. 4a et b.
Position des axes dans des cristaux de quartz.

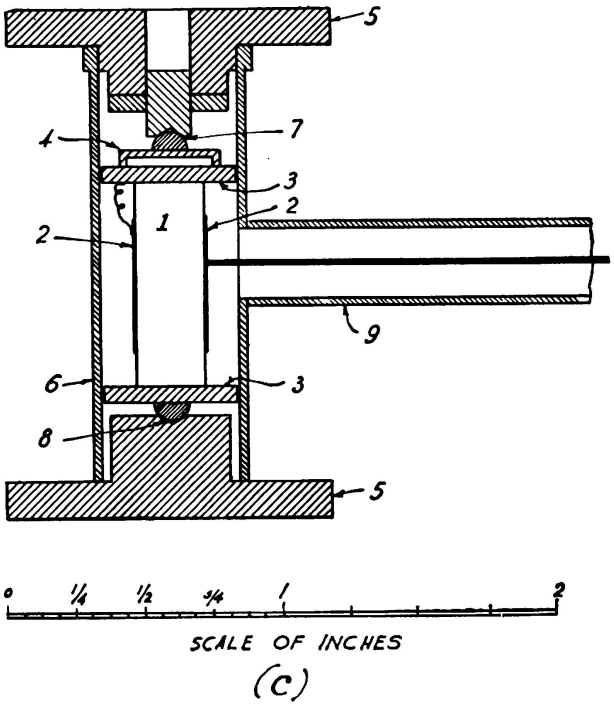

Fig. 4c.
Section à travers la cellule de mesurage.

de vibration très élevée, de manière à suivre avec exactitude et sans retard le mouvement à étudier. Cette exigence a conduit à choisir le dispositif piézo-électrique combiné avec un oscillographe à rayons cathodiques.

Le fonctionnement de l'appareil est basé sur la propriété piézo-électrique du quartz qui, de même que certains autres cristaux, met en jeu des charges électriques proportionelles à l'effort appliqué lorsqu'il est soumis à une com-

pression ou à un allongement suivant la direction de l'un de ses axes hémiédriques, dans certaines parties du cristal. Des cristaux ayant la forme de prismes rectangulaires très allongés sont ainsi découpés dans le quartz brut suivant la direction indiquée sur les fig. 4a et 4b. Les prismes sont ensuite montés dans de petites chambres étanches pour constituer les jauges que l'on enrobe dans le pieu à des endroits convenablement choisis. Lorsqu'ils sont en service effectif, les cristaux sont soumis à une pression le long du troisième axe et des charges électriques qui sont proportionnelles à l'effort ainsi appliqué, sont libérées sur des électrodes solidaires des faces perpendiculaires à l'axe électrique. Les connexions avec le dispositif enregistreur sont réalisées à l'aide de fils conducteurs à haut isolement. La fig. 4c représente une coupe de la jauge. Les chiffres de cette figure désignent: 1° le cristal de quartz, 2° les électrodes, 3° des plaques en acier, 4° un ressort très rigide, 5° des semelles circulaires très épaisses, 6° un cylindre en laiton à parois minces, 7° et 8° des sièges de forme conique et 9° le tube contenant le conducteur isolé.

Lorsque la jauge est assemblée, on soumet le cristal de quartz à une charge initiale en vissant le siège réglable 7; il peut ainsi répondre à des tractions aussi bien qu'à des compressions. Afin que la jauge elle-même soit bien soumise aux mêmes déformations que le béton qui l'entoure, ses dimensions sont choisies de telle sorte que sa rigidité soit sensiblement égale à celle du bloc de béton auquel elle se substitue.

La disposition adoptée pour l'appareil enregistreur des efforts est représentée schématiquement sur la fig. 5.

Enregistreur des enfoncements.

Les enfoncements ont été enregistrés suivant la méthode que représente la fig. 6 et qui a donné des résultats très satisfaisants. Une planchette portant une feuille de papier est solidement fixée sur la partie antérieure du pieu à l'aide d'un dispositif de serrage. Une règle droite, sur laquelle se déplace un crayon qui enregistre l'enfoncement sur le papier, est elle-même fixée sur une pièce de bois massive reposant sur le sol par l'intermédiaire de fortes cales en bois. Le bois forme une base effectivement très stable pour les mesures, car ses vibrations n'apparaissent sur l'enregistrement que lorsque l'enfoncement a été complètement enregistré; même à ce moment, elles sont d'une très faible amplitude. Sur l'enregistrement, on peut obtenir d'une part l'enfoncement permanent ou plastique, d'autre part, l'enfoncement élastique ou réversible, ou mouvement du sol lui-même.

Indicateur des valeurs de pointe des efforts.

Une méthode simple pour mesurer les valeurs maxima des efforts à la tête d'un pieu consiste à utiliser un dispositif qui indique les moments où la retardation maximum du mouton dépasse une certaine valeur choisie à l'avance. En effet, si l'hypothèse suivant laquelle la masse du chapeau peut être considérée comme négligeable et le garnissage à la tête peut être considéré comme constituant un ressort simple (non nécessairement linéaire), est approximativement exacte, la mesure du retardement maximum du mouton permettra de calculer d'une manière très simple l'effort maximum à la tête du poteau, car l'effort exercé par le mouton sur la tête du pieu à tout instant donné est égal

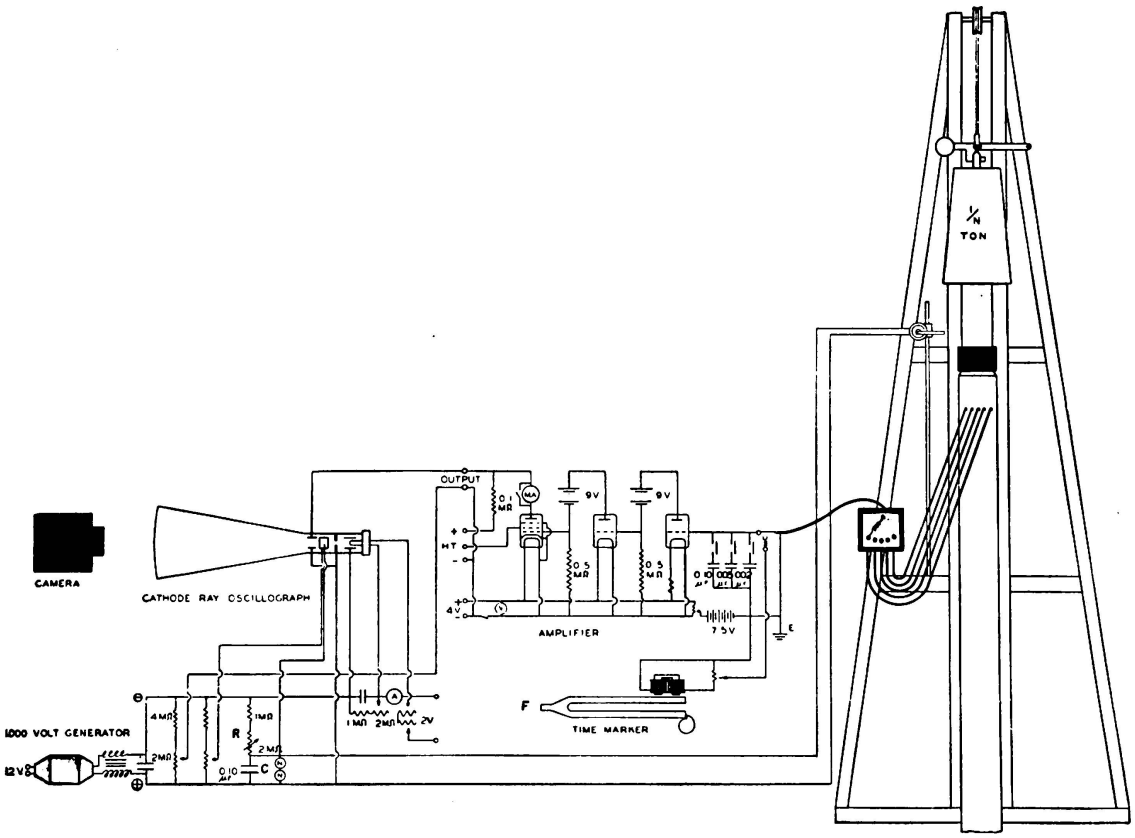

Fig. 5.

Dispositif des conduites électriques de l'appareil enregistrant les contraintes.

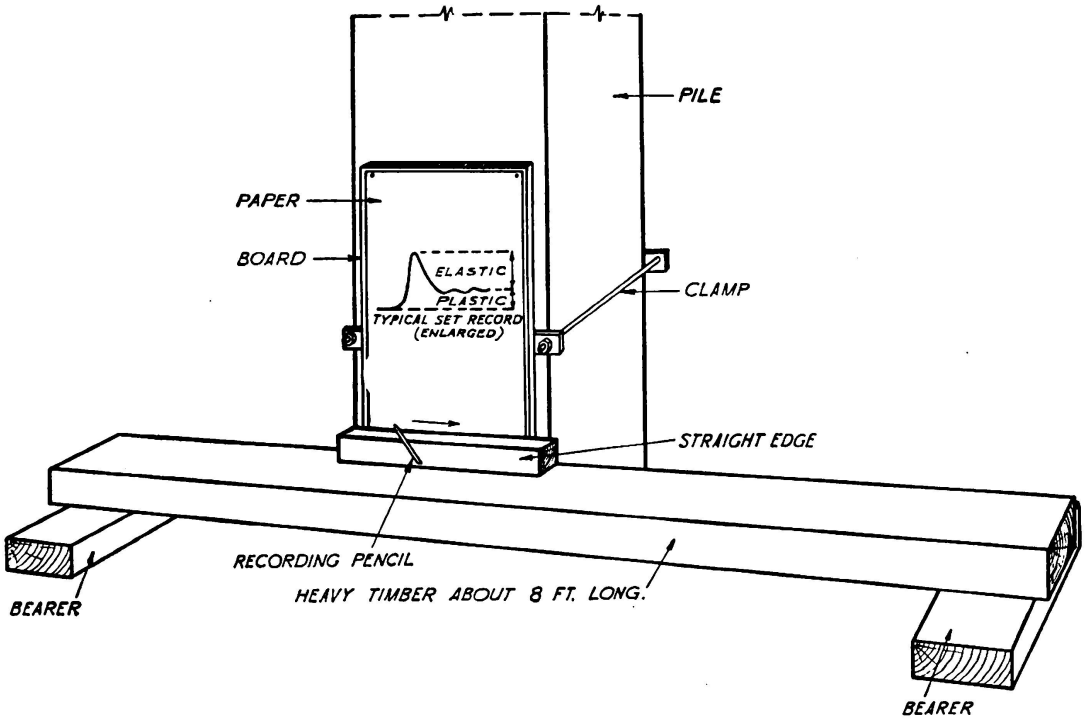

Fig. 6.

Instruments de mesure des enfoncements.

à M · F, expression dans laquelle M désigne la masse du mouton et F sa retardation.

Les indicateurs d'accélération maximum ont déjà été antérieurement utilisés pour indiquer les valeurs de pointe de l'accélération à la surface de routes soumises à des vibrations au cours du trafic.[2] L'instrument employé ici constitue une réalisation quelque peu différente et est utilisé suivant une méthode nouvelle en ce qui concerne l'indication visuelle. Une masse M (fig. 7) est maintenue appliquée en contact avec un goujon isolé I par un ressort S dont la compression peut être modifiée à l'aide d'une vis calibrée C. Des ressorts plats F permettent d'assuter le parallélisme entre tout déplacement de la masse M et la direction des montants P. L'ensemble est monté à la partie supérieure du mouton, l'axe du ressort S étant disposé verticalement. Le contact entre le goujon isolé I et la masse M ferme un circuit électrique, de telle sorte que lorsque la masse M se trouve séparée du goujon I par l'effet de l'inertie, ce circuit se trouve coupé. Le circuit indicateur qui est extrêmement simple est également représenté sur la fig. 7. Une batterie de piles sèches d'environ 150 volts est montée sur trois

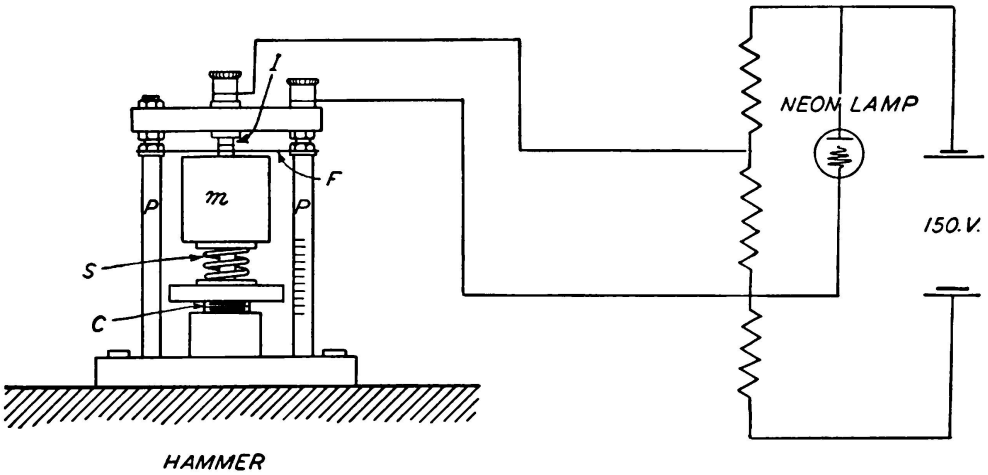

Fig. 7.
Appareil de mesure des pointes de tensions.

résistances disposées en série. Deux de ces résistances sont shuntées par une petite lampé-témoin au néon et l'une de ces deux dernières résistances est normalement court-circuitée par le contact entre la masse M et le goujon isolé I. Lorsque les contacts sont fermés, la tension aux bornes de la lampe au néon a une valeur intermédiaire entre les tensions d'amorçage et d'extinction, de telle sorte qu'il n'y passe aucun courant. Lorsque le contact est coupé entre la masse M et le goujon I, la tension aux bornes de la lampe, c'est-à-dire la tension qui correspond à la chute de potentiel à travers les deux résistances, dépasse la tension d'amorçage et la lampe au néon s'allume, restant encore allumée après la fermeture du contact, car la tension se trouve encore à une valeur plus élevée que celle qui est nécessaire pour l'extinction. Ce circuit électrique constitue un très sensible détecteur de la rupture du contact et peut être utilisé pour fonctionner efficacement

[2] Rapport de l'Association Permanente Internationale des Congrès de la Route, 7ème congrès, Munich, 1934 (2ème section: trafic).

à partir de ruptures d'une durée de 0,0002 seconde. Les essais effectués jusqu'à maintenant ont montré que ce dispositif indicateur permettait de déceler les efforts en tête des pieux avec une erreur possible de l'ordre de 15 %.

Recherches expérimentales.

Mesures des efforts.

A la suite d'essais préliminaires qui confirmèrent les déductions générales faites sur la théorie ondulatoire, des essais ont été effectués sur des pieux foncés dans le sol, dans des conditions de difficulté tout à fait caractérisées. Les détails

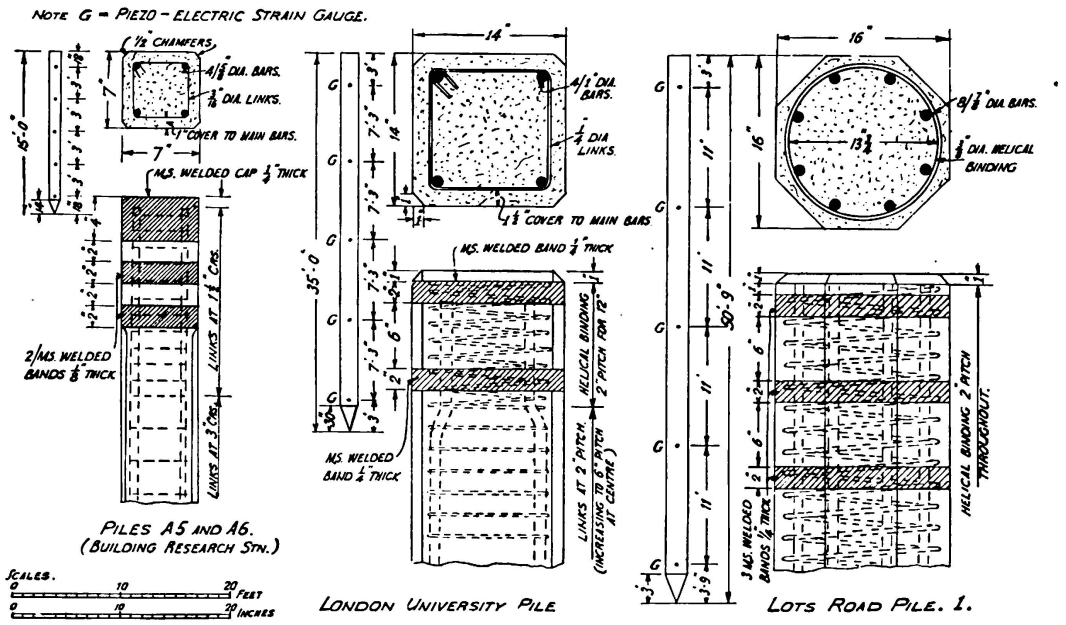

Fig. 8.

Particularités des pieux (détails de la tête du pieu).

Pieux A5 et A6.

Poids du mouton 480, 980 et 2000 livres avec déclenchement de chute, couche intermédiaire (coussinet) 4,12 et 24 couches de carton bitumé, chacune primitiviment 1/4 pouce d'épaisseur.

Pieux de l'Université de Londres.

Sonnette à vapeur simple de 3 tonnes, faux pieu 10 x 14 x 14 pouces en bois de Pynkadon, casque de percussion 10 cwt., garniture 3 1/2 pouces en sapin et 4 couches de sacs.

Pieux du chantier Lots Road.

Mouton de 3,3 tonnes actionné par treuil; faux pieu en bois d'Hickory, 15 pouces de diamètre. Casque de percussion 8 cwt. Garniture avec 2 couches de cordes Manila et 8 couches de sacs.

des pieux sont représentés sur la fig. 8. Les conditions du sol sont indiquées sur la fig. 9, sur laquelle sont marquées les pénétrations auxquelles les enregistrements ont été pris.

L'équipement d'enregistrement piézo-électrique, monté sur une remarque, était installé à une distance d'environ 6 mètres du cadre de fonçage des pieux. Les connexions aux jauges étaient réalisées à l'aide de conducteurs sous plomb de 15 à 30 mètres de longueur.

La marche des essais a été essentiellement la suivante pour tous les pieux foncés dans le sol:

1° Enregistrement de l'enfoncement permanent, avec détermination des valeurs moyennes pour un certain nombre de coups, d'un bout à l'autre du fonçage.

2° Enregistrement des efforts pour plusieurs hauteurs de chute du mouton à quatre ou cinq degrés différents de pénétration, dont les positions effectives ont été déterminées d'après les conditions du sol (voir fig. 9).

3° Chaque groupe de mesures d'efforts a été accompagné des enregistrements correspondants des enfoncements plastiques et élastiques.

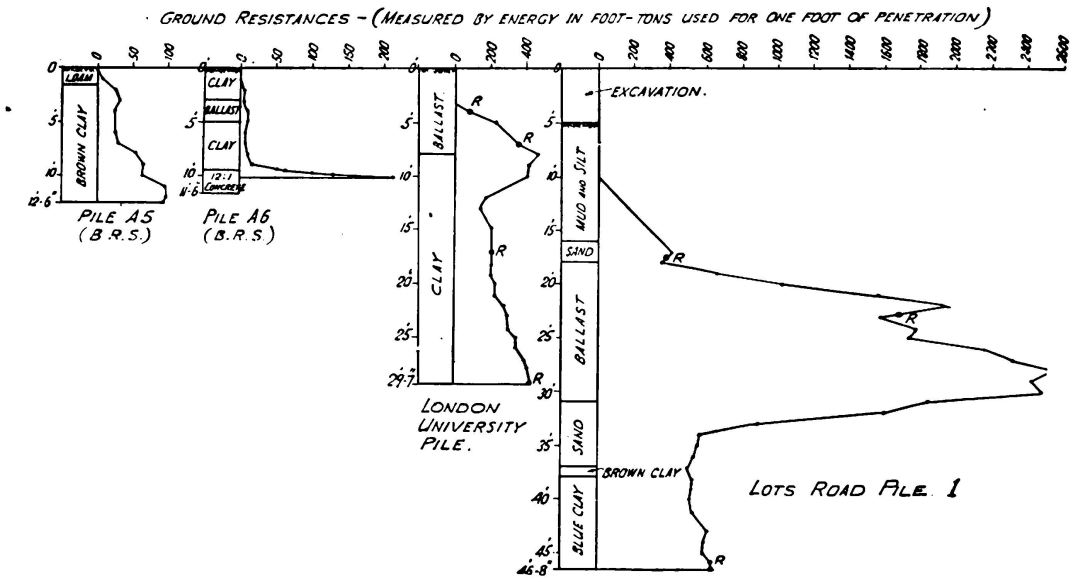

Fig. 9.
Conformation du sol.

Différentes modifications de mise au point des garnissages ont dû être effectuées au cours des fonçages, suivant les nécessités du moment.

Les fig. 10, 11, 12 et 13 représentent des enregistrements caractéristiques effectués avec la jauge piézo-électrique. Dans leur allure d'ensemble, ces enregistrements concordent avec les résultats qu'avait fait prévoir la théorie. La forme de la courbe des efforts en fonction du temps et la valeur maximum des efforts varient sur la longueur du pieu, dans des conditions qui dépendent de l'état du sol. La durée de l'enregistrement à la tête des pieux est généralement de l'ordre de 0,01 seconde; au pied, cette durée peut être plus importante. Les vibrations prolongées qui se manifestent au milieu du pieu suivant la fig. 10 indiquent que, dans certaines conditions, le pieu peut être appelé à exécuter des vibrations longitudinales suivant sa fréquence propre.

Influence des conditions du fonçage sur les efforts mis en jeu dans les pieux.

Dans la majorité des cas, les efforts de compression les plus élevés qui se trouvent mis en jeu pendant le fonçage se manifestent à la tête des pieux. Ce n'est que lorsque les pieux sont foncés dans des couches exceptionnellement dures que cet effort maximum porte sur le pied. Ce fait est mis en évidence sur les fig. 14 et 15. En se basant sur des considérations théoriques, on peut montrer que la

plus forte valeur du maximum de l'effort de compression doit être atteinte soit à la tête soit au pied, quoique dans certains cas il puisse se manifester des valeurs d'efforts seulement légèrement plus faibles en d'autres régions des pieux. Au milieu d'un pieu, on a enregistré des efforts égaux et même occasionnellement

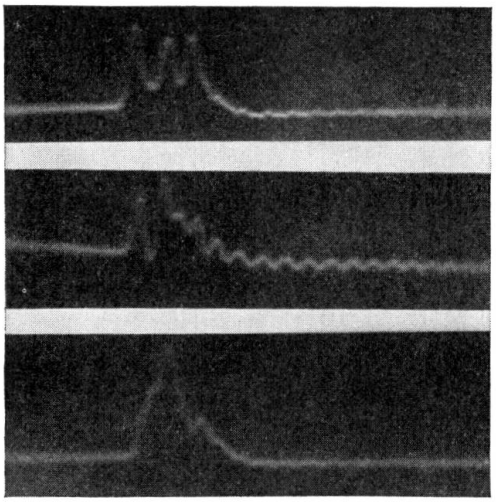

Fig. 10.

Reproduction des vibration longitudinales dans un pieu de 15 pieds de longueur. Fréquence des vibrations: 455 à la seconde.

plus élevés que ceux qui se sont manifestés au pied, mais ces constatations peuvent être considérées comme rentrant dans le cadre des erreurs expérimentales des mesures d'efforts. La fig. 16 établit une comparaison entre quelques valeurs calculées et enregistrées pour les efforts en tête.

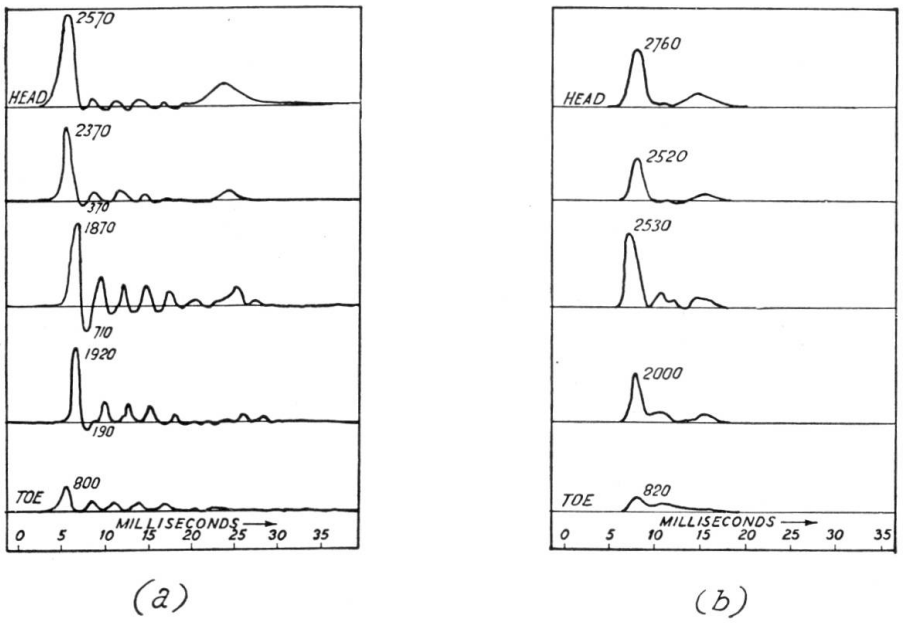

Fig. 11.

Reproduction d'un pieu de 15 pieds de long, enfoncé dans de l'argile compact, à l'Institut de recherches pour constructions civiles

Condition de battage: quatre couches de carton bitumé de 1/4 pouce à la tête; poids du mouton 980 livres; 24 pouces de hauteur de chute. Pénétration: (a) 4 pieds 3 pouces; (b) 10 pieds: enfoncements correspondants (a) 0,55 pouce (b) 0,08 pouce.

(Les figures indiquent les pointes de tensions en livres par pouce carré.

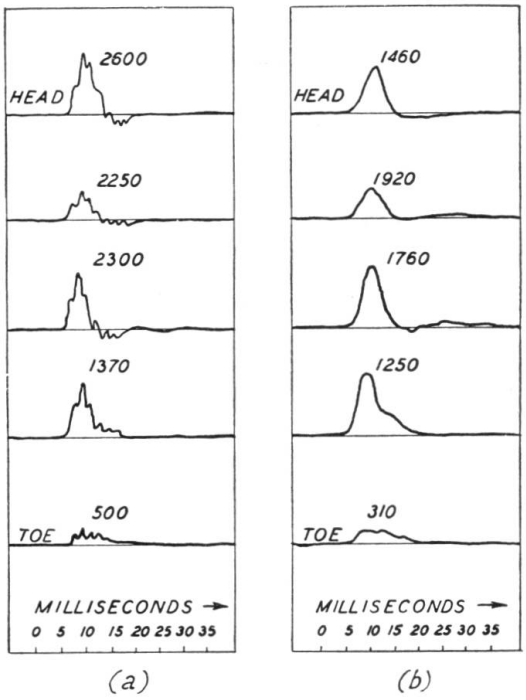

Fig. 12.

Pieux de l'Université de Londres. Résultats caractéristiques.

Conditions de battage: poids du mouton 3 tonnes. Hauteur de chute 24 pouces. Pénétration 29 pied 6 pouces. (a) Garniture de l'entrepreneur, (b) 12 couches de carton bitumé sans casque de percussion. Enfoncement: (a) 0,07 pouce, (b) 0,04 pouce.

(Les figures représentent les pointes de tensions en livres par pouce carré. La petite valeur pour la tête en (b) provient de la contre-pression au mouton.)

En se basant sur des considérations élémentaires, il apparaît comme évident que le maximum de l'effort en tête, pour une série de conditions par ailleurs déterminées, augmente avec le poids du mouton. Cette augmentation est toutefois plus faible proportionnellement que l'augmentation effective du poids du mouton (voir fig. 16).

Dans l'exposé mathématique sommaire de la théorie, il a été mentionné que par suite de la vitesse finie avec laquelle se déplace la variation d'effort, la valeur maximum de l'effort à la tête du pieu est dans la majorité des cas indépendante des conditions du sol et est uniquement déterminée par les conditions en tête

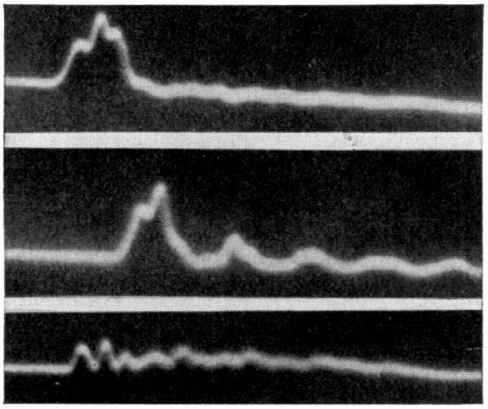

Fig. 13 a.

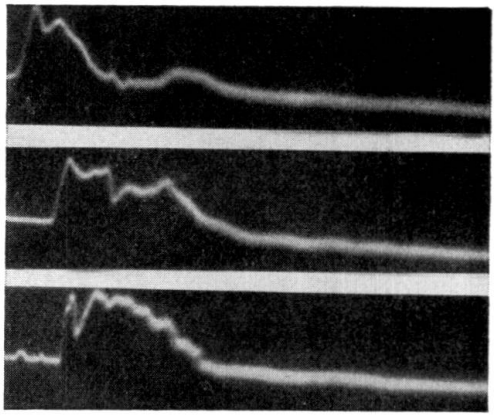

Fig. 13 b.

Chantier Lots Road, pieu Nr. 2. Reproduction typique pour un battage léger (a) et dur (b).

Conditions de battage: garniture d'entrepreneur dans un casque de percussion de 8 cwt; mouton de 3,3 tonnes; hauteur de chute (a) 14 pieds, (b) 25 pieds. Tension de rupture maxima: (a) tête 1590, milieu 1400, pointe 520 livres par pouce carré; (b) tête 1930, milieu 2170, pointe 2760 livres par pouce carré.

Enfoncement (a) 0,94 pouce, (b) 0,06 pouce. Durée du coup: (a) 0,010 seconde, (b) 0,009 seconde.

du pieu, c'est-à-dire par le poids du mouton, par la hauteur de chute, par la surface qu'offre la tête du pieu, par les constantes physiques de ce pieu et par la rigidité du matelas. Ce point de vue est confirmé par les résultats expérimentaux obtenus.

Il est intéressant de déduire de ce qui précède que si le garnissage présente initialement une constante de rigidité élevée, les efforts en tête du pieu au début du fonçage ou dans les périodes de fonçage facile peuvent être presque aussi élevés qu'au cours du fonçage ultérieur, plus difficile.

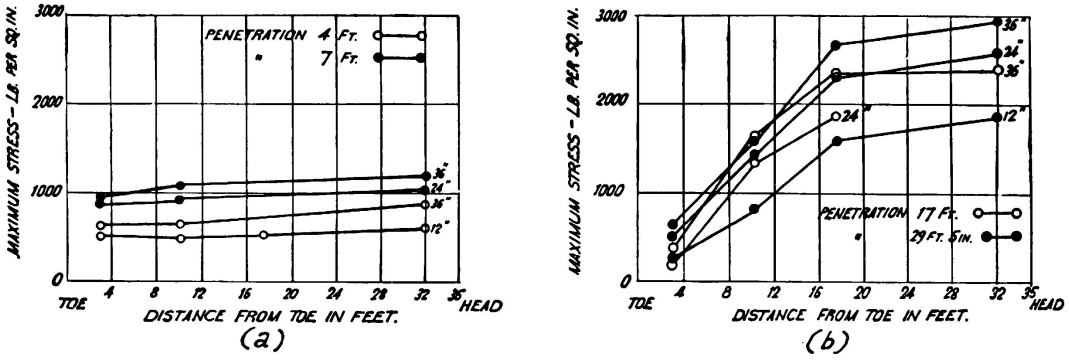

Fig. 14a et b.

Pieux de l'Université de Londres.

Répartition des compressions maxima le long du pieu pour un enfoncement de 29 pieds 5 pouces, avec garniture d'entrepreneur et des hauteurs de chute de 12,24 et 36 pouces.

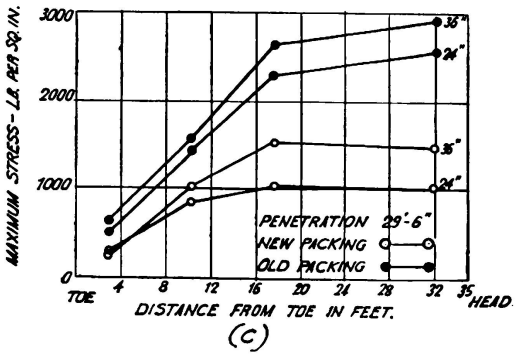

Fig. 14c.

Comparaison entre une garniture d'entrepreneur neuve et usagée, pour une hauteur de chute de 24 et 36 pouces.

Les avantages que présente une constante de rigidité k/A faible seront discutés lorsque nous examinerons l'influence des conditions du fonçage sur les enfoncements. L'influence importante d'une augmentation de la rigidité au cours du fonçage a été mise en évidence d'une manière on ne peut plus nette au cours de l'un des essais qui ont été effectués sur place à l'Université de Londres, le garnissage en bois tendre ayant manifesté une augmentation de rigidité qui a eu pour résultat une augmentation des efforts en tête du pieu de 100 % (fig. 14c).

Si le garnissage n'est pas disposé d'une manière bien uniforme et régulière sur la tête du pieu, il peut en résulter des concentrations locales dangereuses des efforts. On en a rencontré un exemple au cours du fonçage du premier pieu de la Lots Road; la tête du pieu, qui avait résisté à des milliers de coups sans accuser aucune détérioration, a cédé immédiatement après l'insertion d'un garnissage neuf. La rupture a pu être nettement attribuée à une inégale distribution du garnissage, qui avait glissé vers l'arrière du pieu.

Il est mis en évidence expérimentalement (fig. 12) qu'en montant seulement un garnissage à la tête des pieux, les courbes des efforts en fonction du temps particulièrement à la tête ont une forme régulière; avec un chapeau, la forme de l'enregistrement à la tête est celle d'une vibration à haute fréquence, se superposant à une courbe régulière. Le chapeau peut être considéré comme constituant une masse supportée entre deux éléments élastiques, l'avant-pieu au-dessus et le garnissage au-dessous. L'oscillation à haute fréquence qui apparaît dans

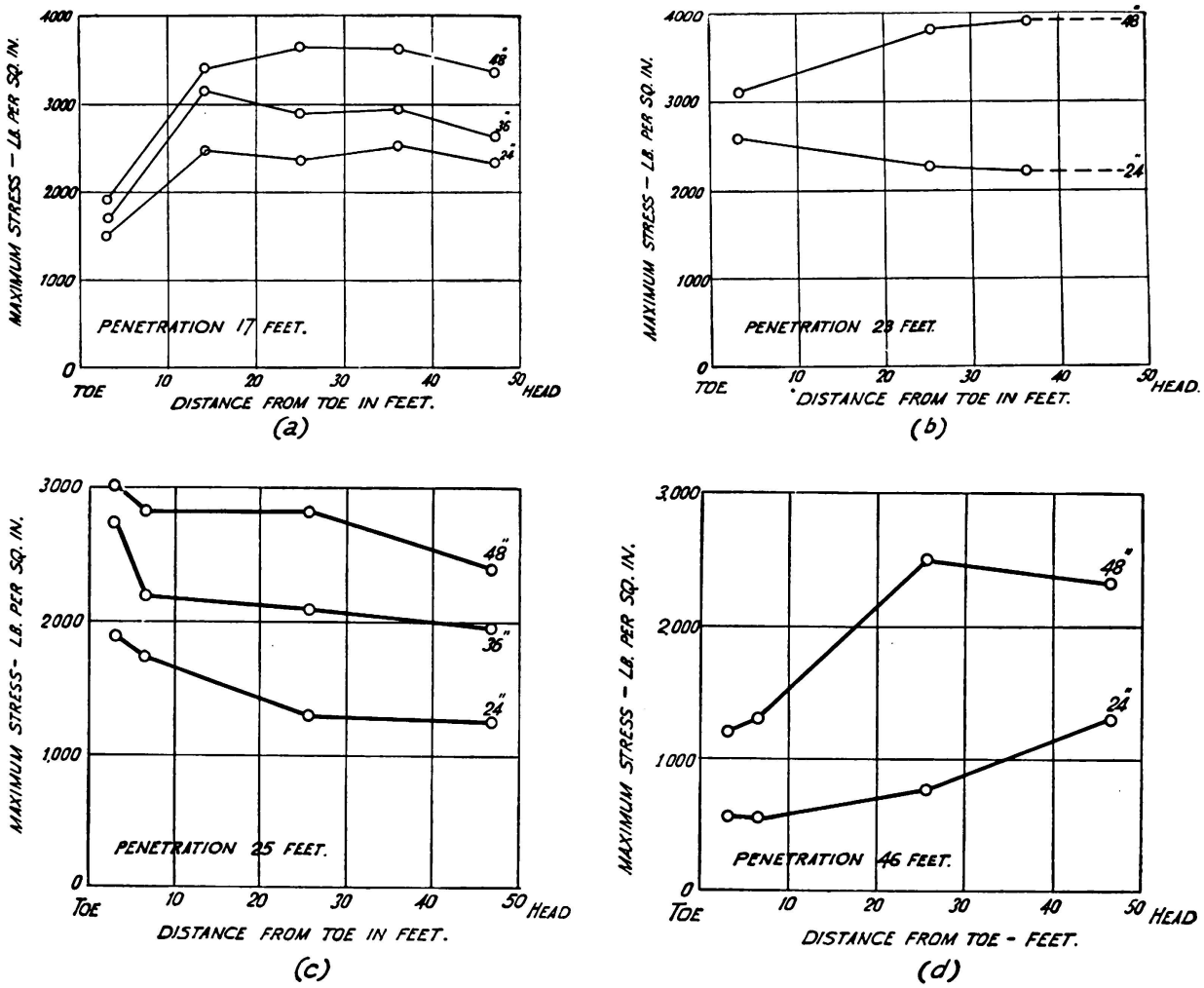

Fig. 15.

Pieux du chantier Lots Road.

Répartition des compressions maxima le long du pieu pour enfoncement de 25 pieds, avec garniture d'entrepreneur et des hauteurs de chute de 24,36 et 48 pouces.
(a) et (b) pour le pieu 1; (c) et (d) pour le pieu 2.

l'enregistrement correspond aux vibrations de cette masse entre ses supports élastiques. L'amplitude de l'effort maximum se trouve dans la plupart des cas assez peu affectée par ces oscillations qui sont très rapidement amorties.

Une portion considérable de la longueur du pieu à partir de la tête peut être soumise à un effort maximum presque aussi grand que celui de la tête. Ceci se produit lorsqu'il n'y a pas interférence de la part de l'onde réfléchie, la seule

diminution que subit l'effort maximum pouvant alors être uniquement attribuée à la dissipation de l'énergie par frottements interne et superficiel. Les pieux de 15 mètres de la Lots Road constituent des exemples qui montrent que l'effort maximum le long de la moitié supérieure de la longueur du pieu peut être approximativement constant (fig. 15). En pareil cas, la rupture par compression peut s'amorcer à une certaine distance au-dessous de la tête du pieu, s'il existe là un point faible dû à une détérioration en cours de transport, à un renforcement transversal peu judicieux ou à une mauvaise qualité du béton.

Les efforts en pied dépendent dans une large mesure des valeurs des enfoncements, de petits enfoncements mettant en jeu de grands efforts et réciproquement. Les efforts en pied ne deviennent importants que dans des conditions

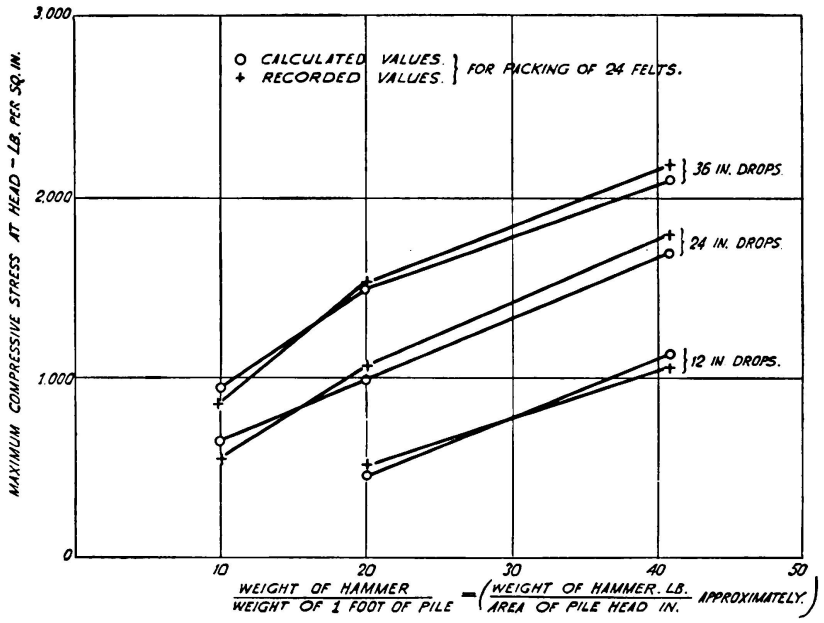

Fig. 16.

Tensions calculées et mesurées à la tête d'un pieu long de 15 pieds.

telles que leur valeur maximum ait quelque chance de dépasser ou d'égaler la valeur de l'effort en tête, en supposant que la tête et le pied aient la même résistance.

Les efforts enregistrés au cours du fonçage des pieux d'essai dans les conditions de la pratique ont montré que les efforts en tête n'étaient dépassés que dans le cas d'un seul emplacement pour lequel le fonçage était particulièrement dur (voir fig. 15c). La résistance ici rencontrée au pied était due à la présence d'une couche de blocaille de 4 mètres d'épaisseur et elle était telle qu'il a fallu de 600 à 1200 coups de mouton par mètre de pénétration.

Les valeurs calculées et enregistrées des efforts en pied font l'objet du tableau 1; dans chaque cas, les chiffres calculés sont plus élevés de 20 à 30 % que les chiffres enregistrés. Il semble donc probable que l'influence du frottement superficiel et des pertes à la propagation n'est pas négligeable, même dans les cas extrêmes d'une forte résistance en pied.

Tableau 1.

Comparaison entre les efforts au pied calculés et enregistrés.

Pieu	Poids du mouton en kg	Hauteur de la chute en cm	Garnissage	Enfoncement élastique équivalent en cm	Effort maximum au pied en kg par cm² calculé	enregistré
Building	450	30,5	12 feutres	0,44	120	92
Research		61	,,	0,99	137	117
Station		91,5	,,	1,07	197	140
4.50 m	900	30,5	,,	0,46	171	124
		61	,,	1,35	197	156
Lots Road	3250	61	de l'entre-	0,66	231	183
nº 1			preneur			
		122	,,	1,14	280	217
nº 2		61	,,	5,84	187	133
		91,5	,,	8,64	231	194
		122	,,	1,04	276	213

Les efforts de traction de courte durée, mais d'amplitude considérable qui se produisent dans la partie médiane des pieux, peuvent s'expliquer du point de vue théorique. On a reconnu ce fait dès le début des investigations et on a considéré que cela pouvait être l'une des causes les plus importantes de rupture au-dessous du niveau du sol. Les résultats des mesures des efforts sur des pieux foncés dans des conditions correspondant à la pratique n'ont toutefois pas confirmé ce point de vue.

Les résultats obtenus montrent que pour que de grands efforts de traction soient mis en jeu, il faut que le pieu soit libre de vibrer suivant son régime fondamental propre, avec ventres, c'est-à-dire avec points d'amplitude maximum et d'effort minimum, à ses extrémités. Pour que ces conditions soient remplies, il faut que la résistance du sol soit faible et que les conditions en tête du pieu soient telles que le mouton rebondisse très rapidement et laisse la tête du pieu libre; c'est-à-dire qu'il faut adopter un garnissage dur et un mouton léger. Dans l'état actuel de nos connaissances expérimentales, il ne semble pas qu'il puisse se manifester d'efforts de traction dans les conditions pratiques du fonçage des pieux; il est intéressant de noter qu'aucun indice de fracture sous traction n'a été observé pendant le fonçage des pieux d'essai de 4,50 mètres de longueur à la Building Research Station, quoique l'on ait enregistré des efforts de traction supérieurs à la résistance à la traction du béton.

Une série de graphiques que reproduisent les figures 17, 18 et 19 permettent de se rendre compte de toutes les conditions particulières du fonçage des pieux, afin de déterminer si les efforts maxima de 210 kg par cm² ou de 140 kg par cm² ont quelque probabilité d'être dépassés au cours du fonçage. Trois conditions concernant le matelas de tête ont été prévues, à savoir le matelas doux, le matelas demi-dur et le matelas dur. Pour tous les types de garnissages étudiés, on a constaté que l'état dur se manifestait après environ 1000 coups.

A partir de la fig. 17, on obtient tout d'abord le rapport entre le poids du

mouton et du chapeau et le poids d'une longueur d'un pied du pieu (1 pied = 0,305 m). A partir de la figure 18a ou 18b, suivant que l'on choisit comme maximum pour les conditions effectives de service l'effort de 2000 livres par pouce carré (140 kg par cm²) ou l'effort de 3000 livres par pouce carré (210 kg par cm²), on obtient la hauteur effective de chute pour les conditions particulières de matelassage en tête nécessaires. Cette hauteur effective de chute est alors convertie en hauteur de chute libre à l'aide de la fig. 19. Toute hauteur de chute plus grande mettra en jeu un effort en tête de pieu qui sera supérieur à la valeur prévue.

Les fig. 18a et 18b permettent également de déterminer l'enfoncement élastique équivalent qui produit un effort semblable au pied, c'est-à-dire soit 2000, soit 3000 livres par pouce carré (ou 140 ou 210 kg par cm²). Les enfoncements élastiques équivalents plus faibles et tombant au-dessous de la courbe produiront des efforts plus élevés. Pour les efforts en pied, une tolérance de 30 % a été admise pour tenir compte du frottement.

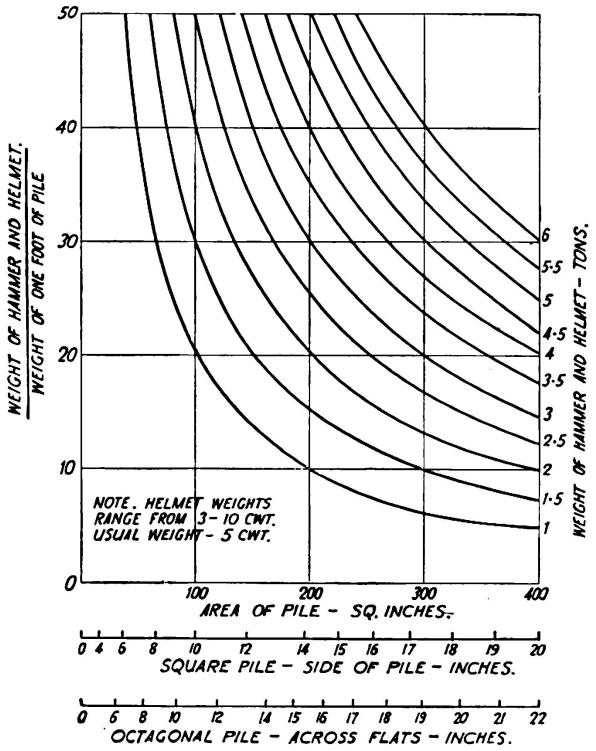

Fig. 17.

Table pour le rapport $\frac{\text{poids du mouton et du casque}}{\text{poids d'un pied courant de pieu}}$

(poids du béton armé égal 160 livres par pied cubique.)

Influence des conditions du fonçage sur l'enfoncement du pieu.

Au cours de ces investigations, des renseignements très nombreux ont pu être obtenus sur l'influence de conditions du fonçage sur l'enfoncement des pieux. On admet généralement que le rendement en énergie de l'opération de fonçage augmente avec le poids du mouton employé. Les résultats des essais confirment entièrement cette conception. Ils montrent également que cette influence est moins marquée pour le fonçage aisé que pour le fonçage dur.

L'emploi d'un mouton lourd présente un autre avantage tout au moins aussi important que celui du bon rendement en énergie. La théorie et l'expérience montrent que lorsque les hauteurs de chute sont réglées de manière à fournir le même effort maximum en tête du pieu, l'enfoncement diminue en même temps que le poids du mouton.

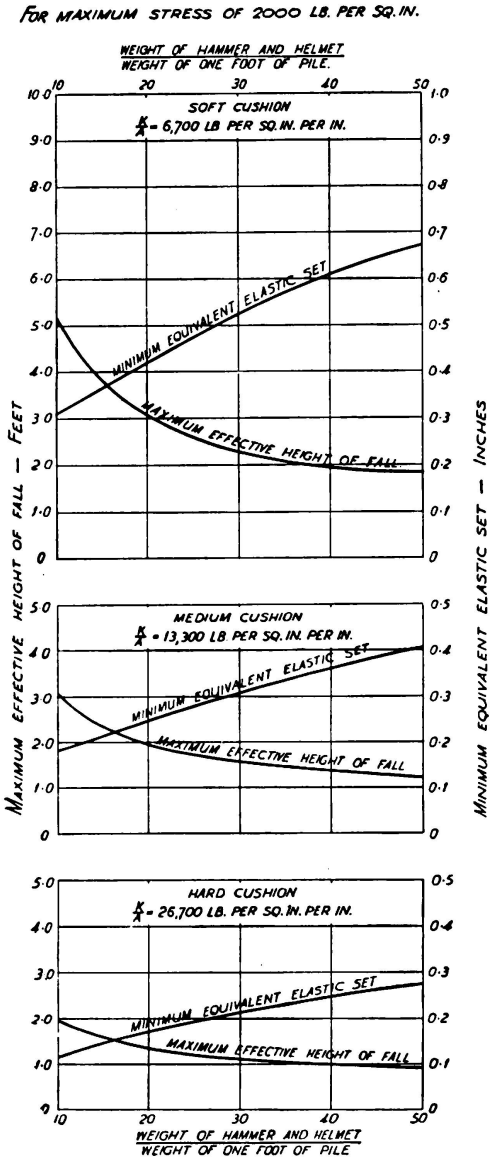

Fig. 18a.

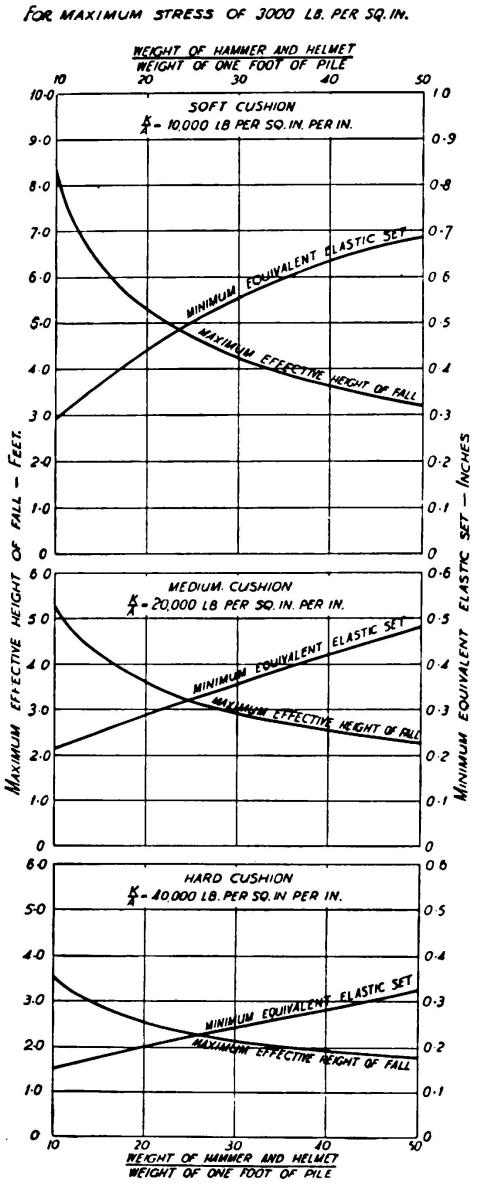

Fig. 18b.

Rapport entre les relations: $\frac{\text{poids du mouton et du casque}}{\text{poids du pied courant de pieu}}$ et la hauteur de chute réelle et la plus petite valeur équivalente de l'enfoncement élastique pour une tension maxima de 3'000 livres par pouce carré ($2^1/_2$ % d'armature longitudinale du pieu, module d'élasticité pour le béton: $4{,}5 \times 10^6$ livres par pouce carré.

La rigidité du matelas de tête s'est comme on l'a vu révélée comme exerçant une importante influence sur les efforts; cette influence sur les enfoncements est également considérable, avec cette différence toutefois que l'influence exercée sur les enfoncements dépend beaucoup plus largement des conditions du sol.

Dans les limites des investigations effectuées, le rendement en énergie d'un mouton a été constaté comme étant maximum lorsque l'on emploie le garnissage le plus rigide, le gain en rendement augmentant d'ailleurs avec la dureté du fonçage. Par exemple, les rendements en énergie de deux moutons de 220 kg et de 440 kg qui ont été employés pour le fonçage d'un pieu de 4,50 mètres à travers une argile tendre n'ont pas été pratiquement influencés par le remplacement d'un garnissage à quatre feutres de 6 mm par un garnissage à 24 feutres. Par contre, dans le cas d'un fonçage moyennement dur, une réduction de la constante de rigidité du matelassage a été accompagnée d'une diminution appréciable du rendement en énergie. On a également observé qu'au cours des dernières phases du fonçage des pieux de 15 mètres de la Lots Road et en effectuant des coups d'essai avec des épaisseurs de garrnissage de 12 et de 24 feutres,

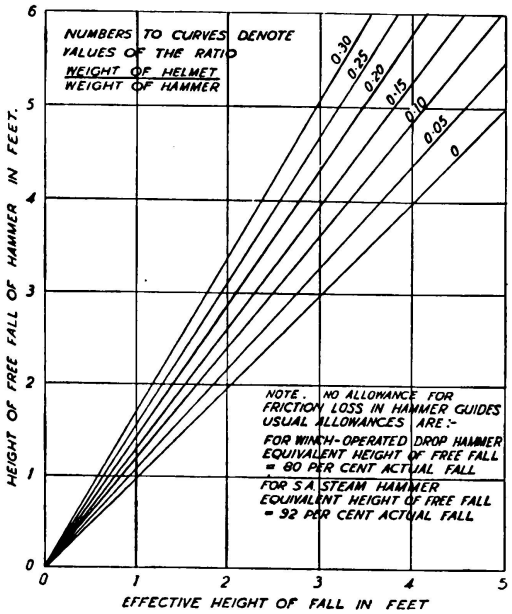

Fig. 19.

Transformation de la hauteur de chute effective en hauteur de chute libre du mouton.

Les indices des courbes signifient les rapports: $\frac{\text{poids du casque}}{\text{poids du mouton}}$

Remarque: Sans considération des pertes dues au frottement dans le collier de guidage du mouton

On considère généralement:

Pour moutons actionnés par treuil: Equivalent de la chute libre = 80 % de la hauteur de chute réelle.

Pour sonnette à vapeur simple: Equivalent de la chute libre = 92 % de la chute réelle.

les enfoncements pour une hauteur de chute déterminée étaient dans tous les cas plus grands avec 12 qu'avec 24 feutres.

Cette influence est importante du point de vue de l'exactitude probable des prévisions de capacité portante d'un pieu sur la base des coups de mouton d'épreuve. Il est généralement admis qu'il ne faut pas compter pouvoir appliquer d'une manière tout à fait générale une formule de capacité portante quelle qu'elle soit et que le succès avec lequel une formule déterminée peut être employée dépend largement de l'habileté avec laquelle celui qui l'utilise fait intervenir les conditions effectives du sol et du fonçage lui-même. Il est évi-

demment de tout intérêt de réduire le nombre de facteurs dont il y a ainsi lieu de tenir compte; et étant donné que le rendement en énergie d'un coup diminue lorsque l'on réduit la valeur de k/A dans tous les cas de fonçage autres qu'un fonçage en terrain facile, il est de la plus grande importance que le garnissage employé pour les épreuves soit conforme aux conditions courantes, dans toute la mesure du possible. L'emploi d'un modèle de garnissage standardisé permettrait certainement à ce sujet de se placer dans des conditions idéales; toutefois, dans l'état actuel de la question, il est difficile de faire suggestion d'une forme de garnissage se prêtant judicieusement à une standardisation. A défaut il semble que la meilleure méthode consiste à employer un garnissage déjà bien tassé plutôt qu'un garnissage neuf. Un garnissage déjà bien tassé assure en effet le maximum d'enfoncement pour une hauteur de chute donnée et permet d'obtenir des résultats qui dépendent d'ailleurs moins largement de la matière utilisée, que dans le cas d'un garnissage neuf.

On obtient le plus grand enfoncement pour un effort maximum donné en tête du pieu en employant un garnissage présentant le minimum de rigidité. Il est évident qu'il doit bien en être ainsi lorsqu'il s'agit d'un fonçage facile, puisque le rendement en énergie n'est pratiquement pas affecté par la rigidité du garnissage tandis que l'effort maximum en tête en dépend. La fig. 20 traduit les conditions qui correspondent à un fonçage de difficulté moyenne; enfin, quoique l'on le dispose d'aucune donnée expérimentale en ce qui concerne les fonçages durs, la théorie indique que dans ce cas également, l'enfoncement maximum est obtenu, pour un effet maximum en tête déterminé, en employant le garnissage présentant la plus faible valeur pour k/A.

Il est également très important d'observer que le rendement du fonçage, particulièrement dans le cas des fonçages durs, augmente en même temps que l'effort maximum en tête que l'on atteint; en fait dans le cas des fonçages durs, des chutes inférieures à une certaine hauteur ne donnent aucun enfoncement permanent. Au cours du fonçage d'un pieu de 15 mètres à la Lots Road et à la profondeur de 12,70 mètres, les enfoncements permanents pour des hauteurs de chute de 6,10 de 9,15 et de 12,20 mètres ont été respectivement de 1 mm, de 2,5 mm et de 4,8 mm respectivement.

Il est donc particulièrement important, dans le cas des fonçages durs, et si l'on veut obtenir de bons rendements en enfoncements, que la tête du pieu ne subisse aucune détérioration, car l'effort maximum qu'il est possible d'appliquer sur la tête d'un pieu, déjà endommagée, sans risquer une dislocation progressive, est toujours beaucoup plus faible que l'effort que l'on peut appliquer sur une tête saine.

Conditions optima de fonçage.

Les conditions les plus favorables pour le fonçage des pieux peuvent s'exprimer sous les deux formes suivantes: ces conditions peuvent être celles qui produisent les plus grands enfoncements pour la plus faible dépense en énergie, sans préjuger des efforts mis en jeu dans le pieu, ou bien celles qui produisent les plus grands enfoncements pour les plus faibles efforts dans le pieu, sans préjuger de l'énergie dépensée. Toutefois, comme dans la majorité des cas, la considération essentielle est d'assurer la protection des pieux contre la rupture et que

la quantité d'énergie dépensée est de moindre importance, pourvu qu'elle reste dans des limites raisonnables, on admettra que les conditions les plus favorables au fonçage sont celles qui assurent la réduction au minimum des efforts mis en jeu dans les pieux.

Dans le cadre des conditions qui ont fait l'objet des investigations considérées, on a pu montrer que les conditions les plus favorables au fonçage, représentées par la valeur du facteur $\frac{\text{enfoncement}}{\text{effort maximum en tête}}$, se manifestaient sans exception en employant le mouton le plus lourd conjointement avec le matelas de tête de rigidité minimum; il y a tout lieu de supposer que cette règle peut être appliquée d'une manière générale et qu'elle est virtuellement indépendante du type de sol dans lequel le pieu est foncé.

Dans certaines conditions de fonçage moyennement dur et dur, l'emploi d'un matelas de tête de faible rigidité implique une diminution du rendement en

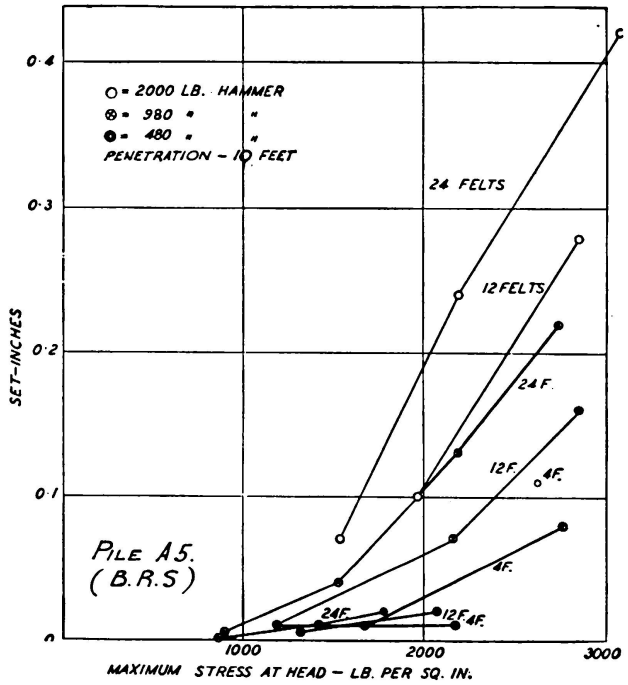

Fig. 20.

Variation de l'enfoncement permanent en fonction des compressions maxima à la tête pour un pieu de 15 pieds de lengueur.

énergie. Dans quelques cas, toutefois, cette perte peut être suffisamment importante pour justifier l'adoption d'un matelas plus dur, car avec la plupart des pieux, la marge de résistance dont on dispose ne serait pas suffisante pour permettre une augmentation appréciable des efforts mis en jeu au cours du fonçage. Il semble donc que les modifications à apporter à l'équipement de fonçage pour réaliser de meilleures conditions pratiques devraient tendre à augmenter la durée des coups et à réduire la valeur maximum de l'effort mis en jeu.

Indicateur des valeurs maxima des efforts.

L'instrument peut être utilisé à deux fins, d'une part pour mesurer l'effort maximum sur la tête du pieu au cours d'une phase particulière du fonçage et

d'autre part pour indiquer, par l'allumage d'une lampe-témoin au néon, le dépassement des efforts en tête au-delà d'une valeur déterminée. A partir de la valeur de l'effort maximum en tête, il es possible de déterminer: 1° la constante k/A du garnissage et 2° une valeur approximative de la résistance du béton à l'impact, en mesurant l'effort maximum en tête du pieu pour la plus grande hauteur de chute qu'il soit possible d'adopter sans rupture de la tête.

Il est évident que lorsqu'il est monté pour indiquer le dépassement d'une valeur prédéterminée des efforts en tête, l'instrument se comporte comme un signal d'alarme par rapport aux efforts en tête, puisqu'il avertit lorsque la hauteur du coup doit être réduite ou qu'il faut remplacer le garnissage.

Essais de destruction.

Outre les essais ci-dessus décrits, un grand nombre de pieux de 4,50 mètres ont été soumis à des essais de destruction. A cet effet, les pieux ont été foncés sur un gros bloc de béton, en employant à la base des pieux des garnissages judicieusement prévus pour réaliser toute condition voulue de résistance au pied du pieu. Les pieux avaient une section carrée de 178 mm de côté; on a utilisé un mouton de 440 kg. Les facteurs qui ont été étudiés sont les suivants:

1° Importance et disposition des armatures.
2° Type et âge du ciment à l'essai.
3° Teneur en ciment.
4° Traitement superficiel.
5° Nature des aggrégats.

On trouvera une description détaillée de ces essais dans les publications auxquelles il a déjà été renvoyé plus haut. Les conclusions sont exposées dans la suite du présent rapport.

Résumé des conclusions.

1° *Considérations concernant les efforts.* Les recherches effectuées tant théoriquement qu'expérimentalement ont montré que la théorie ondulatoire de la propagation des efforts s'appliquait au fonçage des pieux en béton armé. La compression produite par le coup se propage de haut en bas à partir de la tête du pieu et est réfléchie par le pied sous forme de compression lorsqu'il s'agit d'un fonçage dur et sous forme de traction lorsqu'il agit d'un fonçage facile. L'effort en un point quelconque du pieu est égal à la somme des efforts correspondants aux ondes montante et descendante. Dans les fonçages durs, les efforts de compresssion mis en jeu peuvent dépasser 210 kg par cm^2.

Le matelas qui se trouve à la tête du pieu et qui est constitué par l'avant-pieu et par le garnissage dans le chapeau, joue un rôle très important dans la détermination des efforts; plus il est doux, plus l'effort maximum est lui-même faible. Pour un matelas présentant un diagramme linéaire effort-déformation, la constante de rigidité k/A représente l'effort à la tête du pieu qui est susceptible de produire une compression égale à l'unité. Le diagramme de déformation des matelas n'est toutefois pas généralement linéaire et par suite la valeur de k/A doit être définie pour un certain nombre de kg par cm^2. Pour 210 kg

par cm², les valeurs de k/A atteignent en pratique de 280 à 1100 kg par cm² et par cm et pour 140 kg par cm², elles atteignent de 185 à 740 kg par cm² et par cm, k/A étant approximativement proportionnel aux efforts. La plupart des types de garnissage durcissent au cours du fonçage. Avec des pieux dont la longueur dépasse 9 mètres, l'effort maximum en tête est généralement indépendant des conditions qui régnent au pied du pieu.

Dans le cas des fonçages très faciles, c'est-à-dire de ceux dans lesquels on réalise de grands enfoncements, les efforts de compression au pied sont très faibles et l'onde est ainsi réfléchie sous forme de traction; il en résulte, par suite de la combinaison avec l'onde de compression qui descend de la tête du pieu, des efforts effectifs de traction qui augmentent depuis zéro au pied jusqu'à un maximum qui se manifeste au milieu du pieu. On n'a observé aucune rupture qui soit due à ces efforts de traction. Lorsque la résistance au pied augmente, l'effort de compression augmente également et peut théoriquement atteindre deux fois la valeur de l'effort maximum en tête. On a tout au moins observé des valeurs supérieures de 50 % à l'effort en tête.

L'effort au pied dépend du mouvement «total» du pied, c'est-à-dire de l'enfoncement tel qu'il est ordinairement mesuré et du mouvement élastique du sol au pied du pieu. Pour l'évaluation des efforts, on a donné à l'enfoncement ordinaire ou permanent la désignation d'«enfoncement plastique» et au mouvement du sol la désignation d'«enfoncement élastique». La combinaison de ces enfoncements dans les conditions qui sont indiquées ci-après donne ce qui a été désigné sous le nom d'«enfoncement élastique équivalent».

L'enfoncement élastique équivalent = deux fois l'enfoncement plastique (ou enfoncement permanent tel qu'il est habituellement mesuré) + l'enfoncement élastique (ou mouvement du sol).

Les plus mauvaises conditions en pied sont réalisées lorsque la totalité de la résistance à la pénétration est localisée en ce point. Le frottement sur les parois du pieu n'a qu'une faible influence sur les efforts en tête, mais peut exercer une influence importante en ce qui concerne la réduction des efforts au-dessous du sol.

Une méthode simple pour la mesure des enfoncements donne des résultats satisfaisants (voir fig. 6). Il est nécessaire de corriger l'enfoncement élastique pour tenir compte de la compression élastique dans le pieu lui-même. Cette compression est de 0,33 mm par mètre de pieu foncé lorsque l'effort maximum en tête est de 210 kg par cm² et de 0,25 mm par mètre pour un effort maximum en tête de 140 kg par cm². Il est nécessaire de poursuivre les investigations au sujet de l'ordre de grandeur des enfoncements plastique et élastique.

Des graphiques ont été établis pour permettre de déterminer les efforts dans une large gamme de conditions pratiques.

Les meilleures conditions de fonçage sont réalisées lorsque l'on emploie un mouton aussi lourd que possible, avec un matelas en tête aussi peu dur que possible (rigidité k/A minimum), la hauteur de chute étant réglée de manière à donner des coups sans risque de dommages à la tête du pieu. On suggère que l'on pourrait admettre pour le rapport entre le poids du mouton et le poids du pied de longueur du pieu, une valeur minimum raisonnable de 30 (1 pied = 0,305 m). On arrive ainsi pour des pieux de 305, 355, 406 et

457 mm de côté de section carrée, à des poids respectifs de moutons de $2^1/_4$, 3, $3^1/_4$ et $4^3/_4$ tonnes (voir fig. 17).

Dans presque tous les cas, l'enfoncement élastique équivalent augmente pratiquement en proportion du poids du mouton et l'expérience montre que l'enfoncement plastique augmente à une allure plus rapide.

L'effort en tête du pieu peut être déterminé à l'aide de l'indicateur des valeurs de pointe des efforts qui est fixé au mouton et qui mesure sa retardation. De même, l'instrument peut être utilisé pour déceler tout dépassement d'une valeur prédéterminée. La mesure des enfoncements élastique et plastique permet d'utiliser les valeurs des efforts ainsi déterminées pour obtenir les efforts au pied. Les fig. 17, 18 et 19 peuvent être employées à cet effet, l'indicateur étant réglé à 140 ou à 210 kg par cm^2.

2° *Considérations pratiques.* Pour placer le fonçage des pieux sur une base scientifique convenable, il est nécessaire de disposer d'un type de matelas de tête possédant des qualités de permanence suffisante et de rigidité faible et constante. Aucun garnissage absolument satisfaisant n'a encore été trouvé et il est possible qu'un dispositif mécanique soit appelé à prendre la place de l'avant-pieu, du chapeau et du garnissage actuels, fournissant ainsi la meilleurs solution.

La marge de sécurité dont on dispose dans le fonçage des pieux en béton armé est fréquemment si faible que la plus légère négligence dans la fabrication et dans le fonçage peut être suffisante pour provoquer une rupture. La tête du pieu doit être soigneusement formée; toutes les surfaces qui se trouvent à l'intérieur du chapeau doivent être parfaitement planes et orientées à angle droit par rapport à l'axe du pieu. Il est extrêmement important que le garnissage soit disposé d'une manière absolument uniforme et régulière sur la tête du pieu et que la couche qui se trouve en contact immédiat avec la tête du pieu soit constituée par une matière peu dure recouvrant bien toute la surface. La chute du mouton doit se faire bien parallèlement par rapport à l'axe du pieu et le coup doit être aussi bien centré que possible.

La résistance du béton à l'impact doit être de l'ordre de 50 % de sa résistance à l'écrasement. Pour un effort de travail de 210 kg par cm^2, il est donc nécessaire d'employer un béton dont la résistance à l'écrasement n'est pas inférieure à 420 kg par cm^2; pour 140 kg par cm^2, on devra disposer d'un béton dont la résistance à l'écrasement ne sera pas inférieure à 280 kg par cm^2.

Pour obtenir des résistances supérieures à 420 kg par cm^2, il faut adopter des proportions de mélange qui ne soient pas plus maigres que $1 : 1^1/_2 : 3$ (nominal) c'est-à-dire 50 kg de ciment pour 0,53 m^3 de sable et 0,1 m^3 de gros aggrégats. Il faudra veiller avec le plus grand soin au choix des aggrégats, au contrôle de la teneur en eau et au traitement superficiel. (Il est intéressant de noter que la résistance à l'écrasement de 230 kg/cm^2 est exigée pour le mélange $1 : 1^1/_2 : 3$ suivant le «Code of Practice».) Pour des fonçages faciles, lorsque la résistance à l'écrasement peut être plus faible, on peut adopter le mélange 1 : 2 : 4.

Les conditions de traitement des pieux exercent une influence très marquée sur leur résistance à l'impact; les pieux doivent être conservés ainsi longtemps que possible à l'humidité. Sauf dans le cas des fonçages faciles, il est recommandé de prévoir pour cette conservation à l'humidité une période d'au moins 14 jours.

De plus amples informations sont nécessaires en ce qui concerne la résistance à l'impact et les facteurs qui agissent sur cette caractéristique.

Les armatures longitudinales n'exercent pas une influence considérable sur la résistance à l'impact. Par contre, l'importance des armatures transversales affecte profondément la résistance d'un pieu à l'impact, particulièrement à la tête et au pied. Sur une longueur à partir des extrémités du pieu égale à $2^1/_2$ à 3 fois le diamètre extérieur du pieu, il est à recommander d'adopter pour le renforcement latéral un volume d'au moins 1 % du volume total de la longueur correspondante du pieu. Le diamètre des fers transversaux doit correspondre à la pratique courante en matière de béton armé et ne doit pas être inférieur à 5 mm ou au quart du diamètre des armatures principales, si ce quart est supérieur à 5 mm. L'écartement minimum entre les attaches ou fers transversaux en tête et en pied doit être tel qu'il permette un remplissage facile du béton. On a observé par ailleurs que les résultats obtenus avec pieux armés avec fers hélicoïdaux ($2^1/_4$ %) étaient particulièrement bons et quoique le béton ait sauté par places superficiellement, il n'en est résulté aucune diminution des possibilités de fonçage ultérieur des pieux ainsi armés.

Des bandes extérieures de renforcement disposées à l'intérieur des moules avant la coulée du béton améliorent considérablement la résistance de la tête.

La dépendance qui se manifeste entre l'enfoncement obtenu et la nature effective du garnissage explique l'importance de la spécification de cet élément, en vue de l'estimation de la capacité portante. Faute de disposer d'une spécification normalisée, il faut tout au moins spécifier que le garnissage doit être bien compact, ce qui permet d'obtenir à chaque coup l'enfoncement maximum. Jusqu'à maintenant, les investigations n'ont pas encore porté sur l'influence de ce facteur sur la capacité portante des pieux.

Vocabulaire pour les textes des figures.

Anglais	Français
A	
across flats	entre deux côtés parallèles
amplifier	amplificateur
approximately	environ
area of pile	section du pieu
area of pile head	section de la tête du pieu
B	
ballast	ballast
bearer	support
blue clay	argile bleue
board	planche
brown clay	argile brune
building Research Stn.	Institut de recherches du génie civil
C	
calculated values for packing of 24 felts	valeurs calculées pour une garniture de 24 couches de feutre
camera	appareil photographique
cathode ray oscillograph	oscillographe à rayons cathodiques

clamp	étaux
chamfers	chanfrein
clay	terre glaise
concrete in powdered state	béton à l'état pulvérulent
cover to main bars	recouvrement de l'armature principale
D	
dia. bars	diamètre des fers
dia. helical binding	diamètre des frettes hélicoïdales
dia stirrups	diamètre des étriers
distance from toe in feet	distance de la pointe, en pieds
drops	hauteurs de chute
E	
effective height of fall in feet	hauteur de chute effective, en pieds
elastic	élastique
electric axis	axe électrique
electrodes	électrodes
equivalent elastic set	équivalent du tassement élastique
Excavation	fouille
F	
feet	pieds
felts	feutres
G	
ground resistances (measured by energy in foot-tons used for one foot of penetration	résistance du sol, mesurée par l'énergie en pieds tonnes, absorbée pour la pénétration d'un pied
H	
hammer	mouton
hard cushion	coussinet dur
head	tête
head-level when abandoned	cote de la tête après le battage
heavy timber about 8 ft. long	madrier d'environ 8 pieds
helical binding 2" pitch	frettes espacées de 2 pouces
height of free fall of hammer in feet	hauteur de chute libre en pieds
helmet weights range from 3—10 cwt.	poids des casques de 3—10 cwt.
I	
Inches	pouce
L	
lb. per sq. in.	livre par pouce carré
length of pile	longueur du pieu
links at 2" pitch	frettes espacées de 2 pouces
loam	limon
London University pile	pieu de l'Université de Londres
longitudinal reinforcement	armature longitudinale
Lots Road pile	pieu du chantier Lots Road
M	
maximum compressive stress at head	effort de compression maximum à la tête
maximum effective height of fall	maximum de la hauteur de chute effective
maximum stress	tension maximale
maximum stress at head	tension maximale à la tête
medium cushion	coussinet de dureté moyenne
milliseconds	$^1/_{000}$ de seconde
minimum equivalent elastic set	equivalent minimum du tassement élastique
m. s. welded band ... thick	cercle d'acier doux soudé, épaisseur ...
m. s. welded cap ... thick	capuchon d'acier doux soudé, épaisseur ...

N	
neon lamp	lampe au néon
no other rod visible	aucun autre fer visible
new packing	nouvelle garniture
O	
octagonal pile	pieu octogonal
old packing	ancienne garniture
optic axis	axe optique
optic axis perpendicular to plane of paper	axe optique perpendiculaire au plan de la figure
output	puissance
P	
paper	papier
penetration	pénétration (enfoncement)
piezo-electric strain gauge	piézomètre électrique
pile	pieu
plastic	plastique
position of upper portion: assumed length	position de la partie supérieure: longueur admise
position of lower portion: assumed length	position de la partie inférieure: longueur admise
position when pitched	position primitive
pressure-lb. per sq. in.	pression. livre par pouce carré
R	
recording pencil	crayon enregistreur
recorded values for packing of 24 felts	valeurs mesurées pour une garniture de 24 feutres
S	
sand	sable
scales	echelles
scale of inches	echelle des pouces
set	enfoncement
side of pile	pan du pieu
soft cushion	coussinet mou
straight edge	equerre
square pile	pieu carré
T	
time marker	chronographe
third axis	troisième axe
third (pressure) axis	troisième axe de compression
toe	pointe
toe-level when hard driving commenced	position de la pointe du pieu au début du battage
ton	tonne
total weight of pile	poids total du pieu
throughout	continu
typical set record (enlarged)	mesure typique d'en foncement (agrandie)
U	
usual weight 5 cwt.	poids courant 5 cwt.
V	
velocity of hammer at impact	vitesse du mouton au moment du choc
velocity of disturbance along pile	vitesse de l'onde de perturbation le long du pieu
volt generator	générateur électrique
W	
weight of hammer and helmet	poids du mouton et du casque
weight of 1 foot of pile	poids du pieu par pieds courant
where	où

Résumé.

Les entrepreneurs de travaux publics ont souvent rencontré de grandes difficultés pour satisfaire aux spécifications impliquant que les pieux en béton armé devraient être foncés à travers une couche dure jusqu'à atteindre un certain enfoncement dans une couche inférieure et c'est dans ces conditions qu'il s'est produit de nombreuses ruptures tant au-dessus qu'au-dessous du sol. Le présent rapport a pour but d'exposer d'une manière sommaire les résultats des recherches effectuées à la Building Research Station dans le but primordial de mettre au point des moyens permettant d'estimer si les conditions du fonçage sont susceptibles de provoquer la destruction des pieux. Les travaux ont été effectués avec la collaboration et avec l'assistance de la Federation of Civil Engineering Contractors.

Les investigations ont porté sur la mesure, par la méthode piézo-électrique, des déformations qui se manifestent dans les pieux au cours du fonçage. Le dispositif piézo-électrique enregistreur employé est décrit. On a constaté que les déformations étaient profondément influencées non seulement par les conditions effectives du sol, mais aussi par les conditions de la tête du pieu et tout particulièrement par des variations dans l'importance et dans l'état du garnissage de tête.

L'auteur expose une théorie mathématique qui permet d'estimer les efforts, dans certaines conditions pour le garnissage. et l'enfoncement du pieu. Il est montré que cette théorie s'accorde convenablement avec les résultats des mesures qui ont été effectuées, non seulement à échelle réduite, mais également dans des conditions de fonçage dur sur des sols difficiles. On a constaté que les plus grands efforts se manifestaient à la tête et au pied des pieux; les graphiques qui sont présentés permettent de déterminer les efforts à ces endroits.

On trouvera également dans ce rapport les conclusions d'essais effectués sur des pieux de $4{,}50 \times 0{,}178 \times 0{,}178$ m; l'auteur donne des conseils pratiques pour la construction et le traitement des pieux avant fonçage.