

UNIVERSITÉ DE LIÉGE

Cours de Construction du Génie Civil, n° 19.

DÉGRADATION
DE
PIEUX EN BÉTON ARMÉ
PAR LE BATTAGE

NOTE DE

M. F. CAMPUS,

Ingénieur des Constructions Civiles et électricien
(A. I. Br., A. I. Lg. et A. I. E. M.)
Professeur, directeur du Laboratoire d'Essais
du Génie Civil de l'Université de Liège.

EXTRAIT DES

ANNALES DES TRAVAUX PUBLICS DE BELGIQUE
FÉVRIER 1935.

BRUXELLES

GOEMAERE, IMPRIMEUR DU ROI, ÉDITEUR
21, rue de la Limite



—
1935

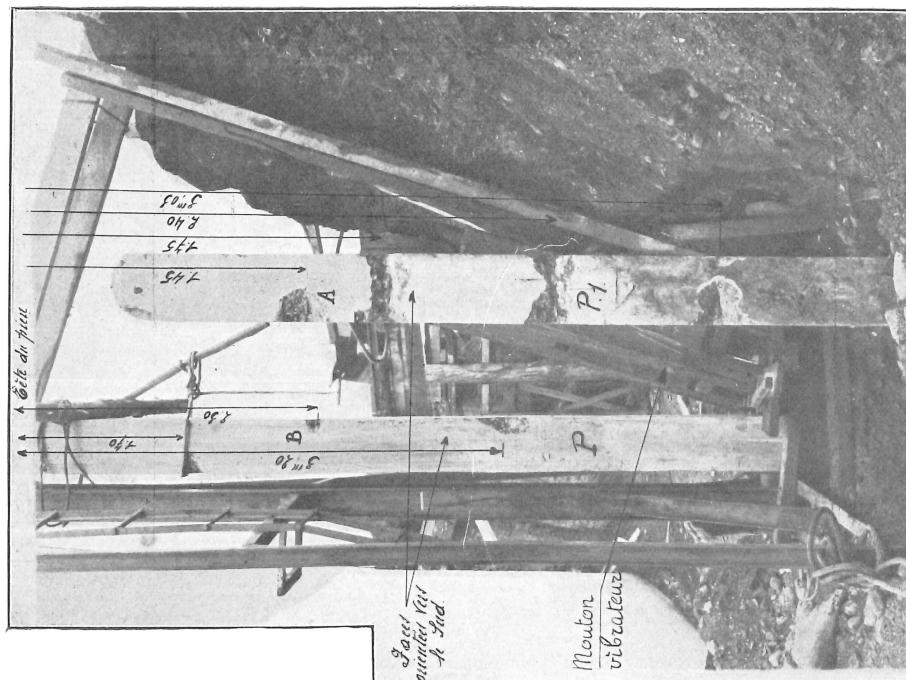


Fig. 2. — VUE DES 2 PREMIERS PIEUX APRÈS BATTAGE ET SONDAGE A L'ENDROIT DES FISSURES.

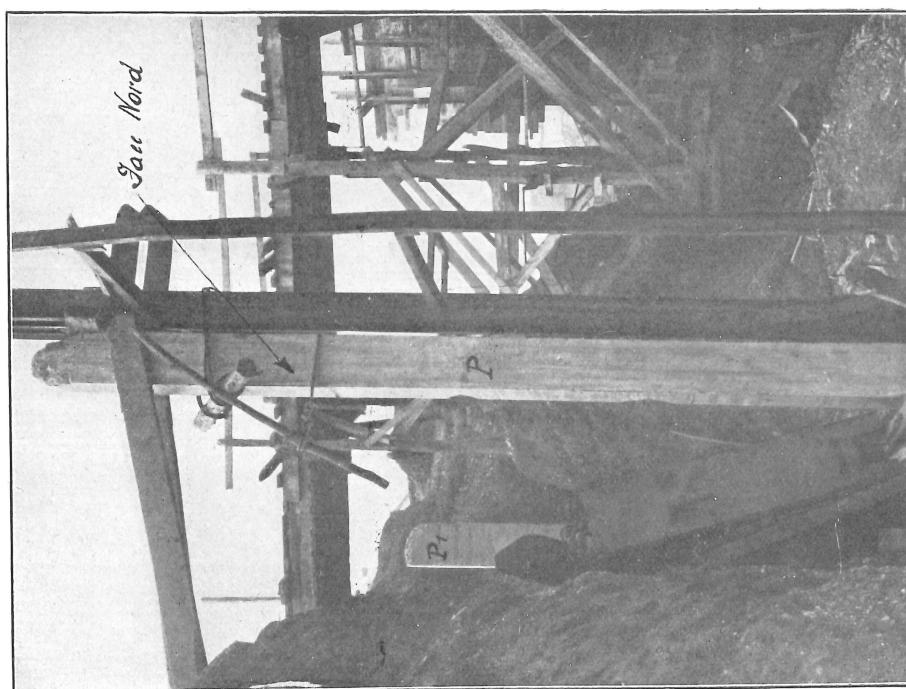


Fig. 1. — STATION DE POMPAGE DU QUAI DU BAC, SCLESSIN-OUGRÉE.

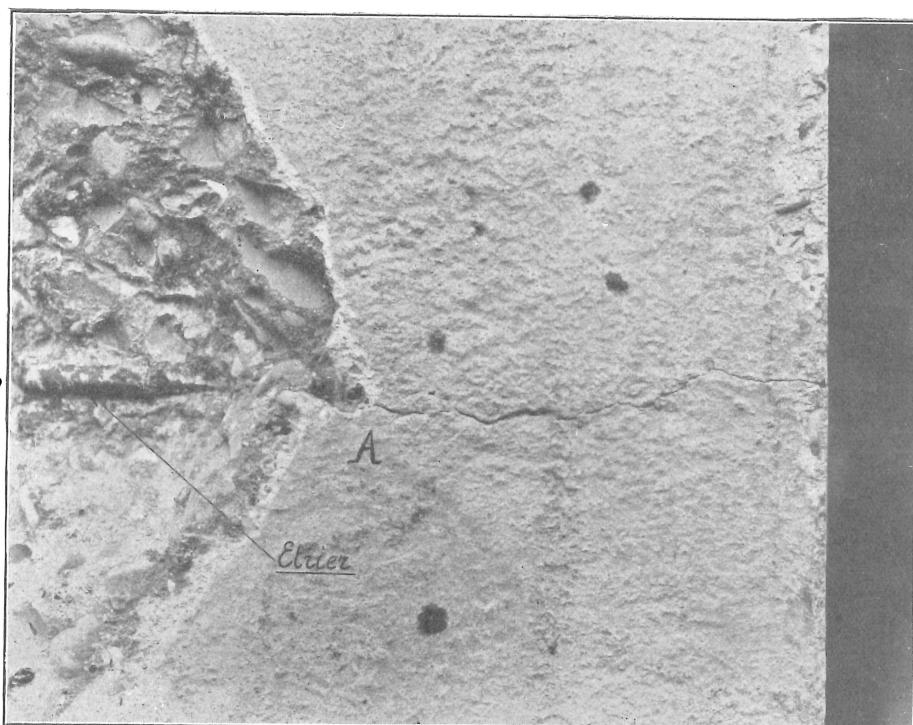


Fig. 3. — FISSURE A (V. fig. 2).

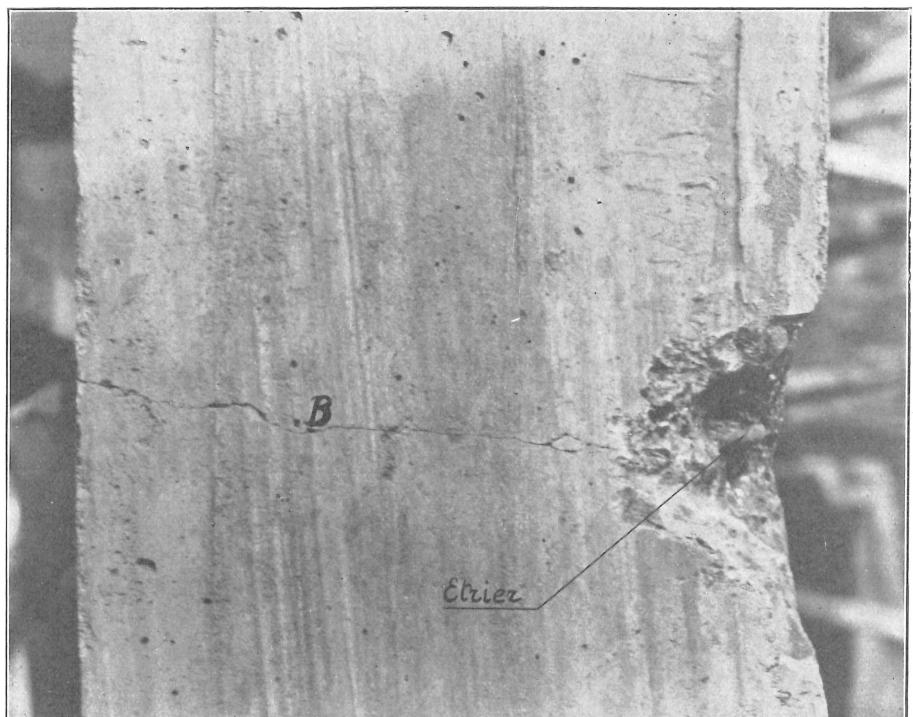


Fig. 4. — FISSURE B (V. fig. 2).

DÉGRADATION
DE
PIEUX EN BÉTON ARMÉ
PAR LE BATTAGE⁽¹⁾

NOTE DE

M. F. CAMPUS,

Ingénieur des Constructions Civiles et électricien
(A. I. Br., A. I. Lg. et A. I. E. M.)
Professeur, directeur du Laboratoire d'Essais
du Génie Civil de l'Université de Liège.

Dans le courant de novembre 1933, le Laboratoire du Génie Civil de l'Université de Liège a reçu un fragment de pieu en béton armé, aux fins de détermination de la résistance du béton. Il était envoyé par l'Association intercommunale de démergence des communes riveraines de la Meuse en amont de Liège et provenait du chantier de construction d'une station de pompage près de la Meuse à Sclessin. Lors du battage de deux de ces pieux au moyen d'un mouton à vapeur automatique à battage rapide, on avait constaté la formation de nombreuses fissures transversales traversant complètement les quatre faces latérales. La figure 5 indique la position des fissures relevées et les enfoncements des pilotes dans le sol. Les pieux, de section carrée de 25 cm. de largeur et de 5 m. 50 de hauteur, étaient

(1) Communication faite le 21 décembre 1933 à l'Association belge pour l'étude, l'essai et l'emploi des matériaux.

1^e pilot battu 2^e pilot battu
(marqué P sur la fig.2) (marqué P sur la fig.2)

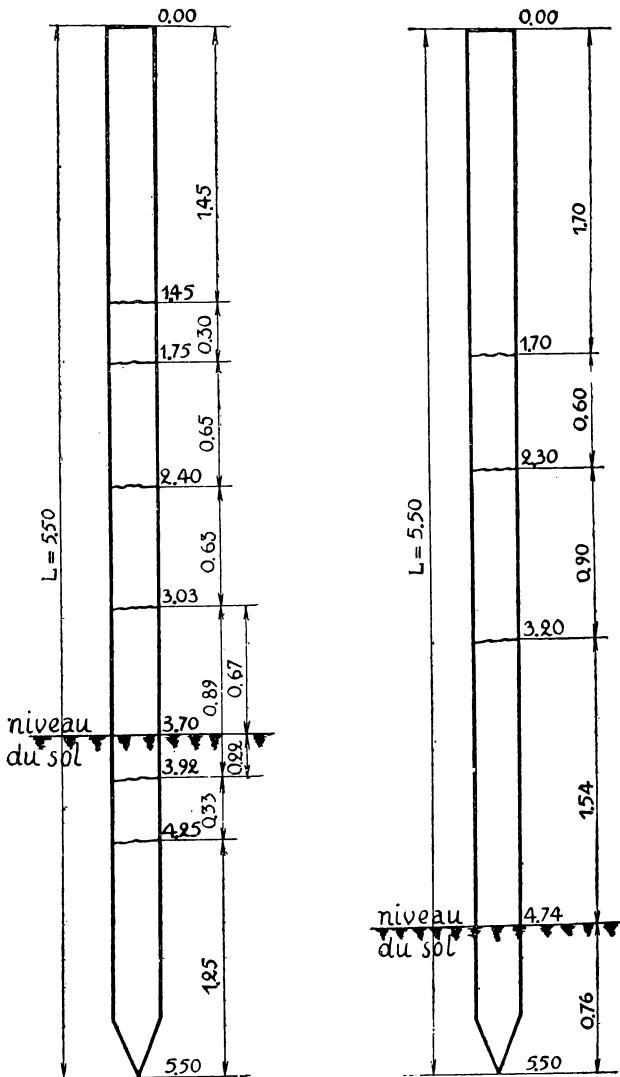


Fig. 5. — Schéma de la fissuration
des deux premiers pieux battus.

peu enfoncés dans le sol et loin d'être mis complètement en fiche lorsque toutes ces fissures étaient formées.

Le dosage du béton était :

800 litres de gravier de Meuse 5/25 ;
400 litres de sable du Rhin 0/3 ;
450 Kgr. de ciment de haut fourneau.

Les pilotis étaient confectionnés depuis environ 6 mois à l'époque de leur battage. Ils étaient armés de 4 armatures d'angle de 12 mm. de diamètre et de 4 armatures médianes de 8 mm. de diamètre, visibles dans le fragment remis au laboratoire, et d'étriers non visibles (fig. 6).

La direction de l'Association intercommunale désirait notamment savoir si les fissures pouvaient être attribuées à la qualité du béton.

Pour examiner ce point, il fut décidé de couper dans le fragment de pieu un prisme ayant comme base toute la section transversale du pieu et de le soumettre à un essai d'élasticité de compression. Ensuite, on tirerait hors de ce prisme un parallélépipède de béton non armé pour le soumettre à un nouvel essai d'élasticité et ensuite le rompre par compression.

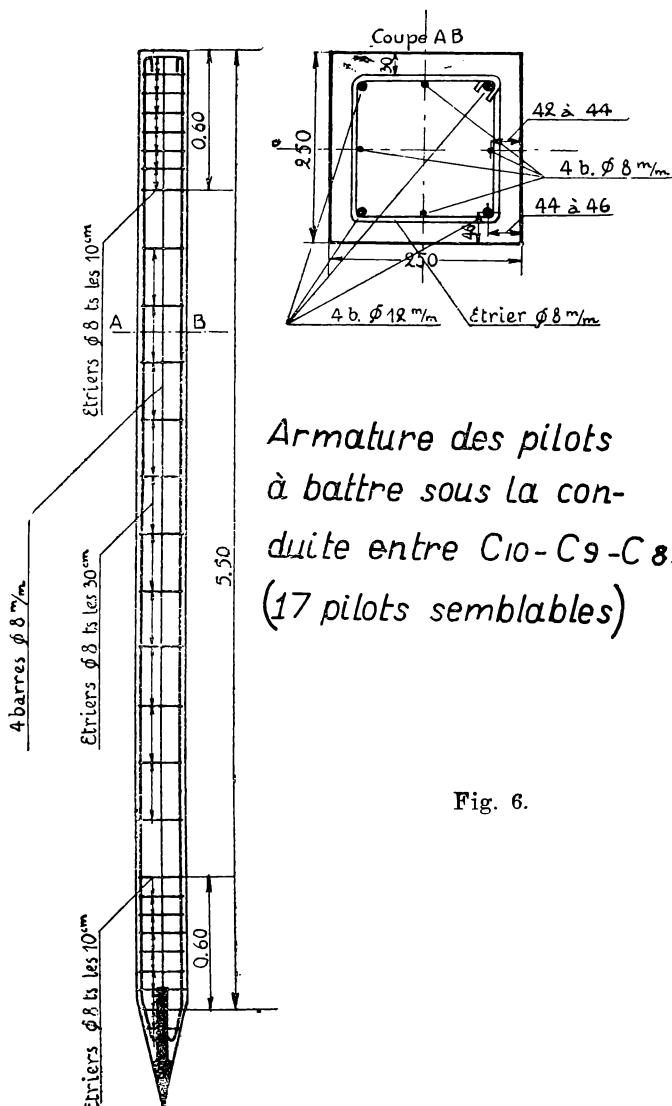
Cependant, le simple examen visuel du béton et de la répartition des fissures, qui indiquait des écartements de fissures voisins de multiples de 0 m. 30, permettait de présumer que la qualité du béton ne pouvait être en cause. Comme les fissures se produisaient lors du battage, il parut nécessaire de s'enquérir de la manière dont on y procédait.

Les données qui furent communiquées au sujet du marteau furent les suivantes :

Poids total : 1400 Kgr. ;
Poids de la masse frappante : 185 Kgr. ;
Nombre de coups par minute : 240.

Les deux pieux avaient été battus sans casque amortisseur. En outre, comme la partie inférieure du marteau était formée de quatre sortes de pieds indépendants, il avait fallu abattre les coins de la tête des pieux pour permettre d'y reposer la base

du marteau. Cependant, on n'avait pas constaté de désagrégation de la tête. Le morceau de pieu remis au laboratoire provenait d'une des têtes (voir fig. 1 et 2).



*Armature des pilotes
à battre sous la con-
duite entre C10 - C9 - C8.
(17 pilotes semblables)*

Fig. 6.

Il était apparent à première vue que ces conditions de battement, caractérisées par une faible masse frappante animée d'une

grande vitesse alternative, donnant au mouvement le caractère d'une vraie vibration à la fréquence de 4 coups par seconde, semblaient opposées à celles que l'enseignement classique recommande, principalement pour les pieux en béton armé, à savoir une masse frappante très pesante, d'un poids au moins égal à celui du pieu, et une faible hauteur de chute.

On pouvait donc être tenté, sans plus ample examen, d'incriminer le mode de battage. Cependant une simple affirmation était insuffisante, car l'entrepreneur croyait, sur la foi d'un prospectus, disposer du meilleur engin. Des raisons d'intérêt plus général rendaient aussi désirable d'élucider davantage la question. L'opinion préappelée concernant les meilleures conditions de battage est généralement fondée sur la théorie de la formule dite des ingénieurs hollandais. Cette théorie est beaucoup trop sommaire pour être décisive. Elle ne concerne d'ailleurs que le rendement. Elle ne donne aucune lumière au sujet de la tenue du béton sous les chocs, ni au sujet de la formation des fissures, ni au sujet de la nocivité des grandes vitesses d'impact et du battage rapide. Ces questions font l'objet de recherches dans certains pays. C'est ainsi que, selon un article de M. Fox (« Stress phenomena occurring in pile driving », *Engineering*, 2 septembre 1932), la Building Research Station anglaise comptait entreprendre une recherche systématique au sujet de ces points, en raison des mécomptes fréquents rencontrés par les entrepreneurs au cours des dernières années. Toutefois, les causes des désagréments précités et les résultats des premiers essais anglais m'étaient inconnus et d'autres facteurs que le battage pouvaient intervenir.

Il n'entre pas dans mes intentions d'exposer à ce propos la théorie mathématique des vibrations dues aux chocs. On sait que ce problème ne peut être considéré comme généralement résolu actuellement, malgré les travaux de Poisson, Barré de Saint-Venant, Boussinesq, Love, Flamant et d'autres savants. Ils ont traité un certain nombre de cas théoriques, qui ne comprennent pas celui du battage des pieux, dont la complication est considérable, ainsi que l'on en jugera par l'exposé sommaire qui suit.

Lors du choc du marteau sur la tête du pieu, deux ondes d'ébranlement élastique partent du point d'impact, l'un vers le haut dans le marteau, l'autre vers le bas dans le pieu. Ces ondes peuvent d'ailleurs avoir, ainsi que nous le verrons plus loin, des composantes diverses. Les études théoriques n'envisagent généralement que la composante longitudinale, qui est d'ailleurs vraisemblablement celle qui emporte le maximum d'énergie. Des déformations permanentes sont probables au point d'impact; le choc n'est que partiellement élastique; c'est un autre accroc aux études théoriques. L'ébranlement longitudinal se propage à très grande vitesse vers la base du pieu. Si celle-ci était infiniment rigide, l'onde serait réfléchie et interférerait avec l'onde initiale; elle se refléchirait de nouveau sur la tête du pieu, etc. Il se formerait finalement une onde stationnaire, comportant des nœuds et des ventres, s'il n'y avait aucune dissipation d'énergie. Cet état ne serait d'ailleurs pas indépendant de celui qui se serait développé dans le marteau; des échanges d'énergie seraient possibles entre le pieu et le marteau; celui-ci pourrait d'ailleurs avoir rebondi lors du choc en retour. Si le marteau est automatique, l'action des coups successifs peut perturber cet état, en rapport avec la fréquence du battage et la propagation des diverses ondes. On conçoit aisément que le phénomène vibratoire qui se développe échappe à une analyse mathématique utile pour l'ingénieur.

Mais la base du pieu n'est pas inébranlable. La force à la base du pieu, qui prend naissance par la propagation de l'onde élastique, comprime le terrain sous la pointe, le déforme, dépasse sa résistance et provoque finalement un enfoncement de la pointe dans le terrain. Une partie de l'énergie — que l'on doit désirer la plus grande possible pour l'efficacité du battage — est donc transmise d'une manière irréversible au terrain par la pointe et aussi par la surface latérale, dans la mesure où un certain frottement est exercé de la part du terrain. Ce frottement peut être diminué pendant le battage par l'effet des vibrations. La manière dont l'énergie est transmise au sol et s'y perd en majeure partie échappe à toute analyse. Quelle est la part de déformation élastique et de déformation permanente

du sol ? Quelle est la détente en retour du sol ? On peut tout au plus en avoir une idée imprécise par l'expérience directe, dans des cas particuliers. L'état vibratoire élastique du pieu et du mouton en sont essentiellement dépendants.

Bref, nous pouvons admettre que le problème est bien défini physiquement. Son analyse mathématique rigoureuse paraît devoir nous échapper longtemps encore et ne présente d'ailleurs aucune nécessité urgente. Il y a encore d'autres pertes d'énergie à considérer. Certains de mes collaborateurs ont assisté à un battage le 30 novembre ; moi-même le 1^{er} décembre. Lorsque le mouton était en action, même à cadence ralenties, tout le système subissait des déplacements transversaux considérables : la palée métallique de la sonnette, les madriers d'attache de celle-ci, le pieu attaché aux jumelles, etc... L'ébranlement du sol était appréciable. Les talus de la fouille dans laquelle on battait les pieux s'éboulaient progressivement (fig. 2). Par visée sur un point fixe, on appréciait les déplacements transversaux du pieu. Les éléments métalliques de la sonnette présentaient le phénomène du « fouettement ». Lors du battage de ces deux pieux, ceux-ci étaient surmontés d'un casque de battage coiffant la tête et reposant sur celle-ci par l'intermédiaire de morceaux de vieux câbles de mine en aloès. Une certaine énergie était dissipée dans tous ces mouvements parasites, dans la vibration du casque et dans l'écrasement du tampon textile amortisseur.

J'ai jugé utile d'essayer d'apprécier un ordre de grandeur des fréquences propres fondamentales des vibrations longitudinales et transversales des pieux, en me basant sur la théorie des vibrations élastiques libres et non amorties des barres droites de section et de masse spécifique constantes. Toutefois, dans l'application de cette théorie bien connue en elle-même, il surgit encore une difficulté du fait qu'il n'est pas possible de définir exactement, en termes mathématiques, les conditions d'extrémité, c'est-à-dire les liaisons. Puisqu'il ne s'agit que d'un ordre de grandeur, j'admettrai l'encaissement parfait de la base du pieu dans le sol, c'est-à-dire l'indéformabilité totale de la base. Pour tenir compte de la masse de 1400 Kgr. du mouton, qui repose sur le pieu, je ferai usage de la formule de Dunkerley, dont

l'emploi correspond sensiblement, en l'occurrence, à l'usage de la méthode approximative de Rayleigh.

J'admettrai que la longueur libre du pieu soit égale à sa longueur totale de 5 m. 50. La densité du béton armé est 2,51 ; celle du béton non armé, 2,45. Comme valeur du coefficient d'élasticité, j'ai adopté la moyenne de celles qui sont définies plus loin pour le béton non armé et pour le béton armé, soit 390.000. La période propre de vibration longitudinale est

$$T_1' = 4l \sqrt{\frac{\Delta}{Eg}} = 22,00 \sqrt{\frac{2510}{39 \times 10^8 \times 9,81}} = 56,4 \times 10^{-4} \text{ sec.}$$

La période de vibration de la masse de 1400 Kgr. est

$$T_1'' = 2\pi \sqrt{\frac{Q}{\Omega Eg}} = 6,283 \sqrt{\frac{1400 \times 5,50}{0,0625 \times 39 \times 10^8 \times 9,81}}$$

$$T_1' = 112,5 \times 10^{-4} \text{ sec.}$$

D'après la formule de Dunkerley, la période combinée serait

$$T_1 = \sqrt{T_1'^2 + T_1''^2}$$

soit : 126×10^{-4} sec. ou 1,26 centièmes de seconde.

La fréquence est égale à $\frac{1}{T_1} = 79,5$ hertz, très supérieure à la fréquence du battage vibratoire.

D'ailleurs, la vitesse du son (vitesse de propagation des ondes longitudinales) dans le béton est

$$V = \sqrt{\frac{Eg}{\Delta}} = 39,00 \text{ m. par sec.}$$

En considérant que la base du pieu soit un nœud, la tête un ventre, la longueur d'onde fondamentale serait $4l = 22,00$ et la durée

$$T_1 = \frac{4l}{V} = 4l \sqrt{\frac{\Delta}{Eg}}$$

comme ci-dessus.

La longueur d'onde de la vibration fondamentale longitudinale est donc d'un ordre tout à fait différent de celui de

la longueur commune 0 m. 30 de l'entre-distance des fissures. Si cette entre-distance représentait une demi-longueur d'onde de vibration partielle, la fréquence correspondante serait

$\frac{V}{0,60} = 6500$ hertz, en comparaison de laquelle la fréquence du

mouton automatique est totalement insignifiante. Il ne peut donc être question d'amplification de la vibration longitudinale sous l'effet du battage rythmé: l'ordre de grandeur des fréquences est tout à fait différent. Les conditions d'appui à la base, qui sont intermédiaires entre l'appui rigide et l'extrémité libre, conduiraient à une fréquence encore plus grande; la conclusion précédente est donc certaine.

La période fondamentale de la vibration transversale propre et libre du pieu encastré à la base est

$$T_2' = \frac{2\pi}{3545} \sqrt{\frac{Q\Delta l^4}{E l g}} = \frac{6,283}{3545} \sqrt{\frac{0,0625 \times 2510 \times 5,5^4}{39 \times 10^8 \times 0,1065 \times 0,25^4 \times 9,81}}$$

$$T_2' = 0,17 \text{ sec.}$$

La période de vibration transversale de la masse du mouton coiffant le pieu est

$$T_2'' = 2\pi \sqrt{\frac{I_{\text{stat}}}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{Q l^3}{5 E l g}} = 6,283 \sqrt{\frac{1400 \times 5,50^3}{3 \times 39 \times 10^8 \times 0,1065 \times 0,25^4 \times 9,81}}$$

$$T_2'' = 0,384 \text{ sec.}$$

D'après la formule de Dunkerley, la période de la vibration transversale d'ensemble est

$$T_2 = \sqrt{T_2' + T_2''} = 0,42 \text{ sec.}$$

La fréquence correspondante est $\frac{1}{0,42} = 2,38$.

On remarquera que pour les vibrations transversales, l'imperfection de l'enca斯特rement de la base du pieu augmente la lon-

gueur d'onde et la période et diminue la fréquence. Le fait d'avoir considéré comme longueur libre du pieu sa longueur totale tend à compenser le caractère excessif de l'hypothèse d'encaissement parfait.

Donc, la fréquence des vibrations transversales est de l'ordre de 2 hertz, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que la fréquence du battage à la cadence normale de 240 coups par minute. Il peut y avoir résonance du partiel d'ordre 2. En cas de battage au ralenti, à la cadence moyenne d'environ 120 coups par minute, l'ordre de grandeur reste encore le même et la résonance de la vibration fondamentale est possible. Il est donc certain qu'il peut y avoir une amplification des vibrations transversales. De même, l'ordre de grandeur de la fréquence transversale propre de la palée métallique de la sonnette devait être le même, à en juger d'après les ébranlements transversaux importants observés lors du battage.

Les vibrations transversales existent incontestablement et inévitablement. Elles existeraient même si le choc était parfaitement axial. Mais il ne peut l'être; un relevé de la position du mouton par rapport à un pieu a indiqué des excentricités de 13 mm. et de 6,5 mm. de l'axe du mouton par rapport à l'axe du pieu respectivement suivant les deux médianes. Il est probable aussi que le pieu et le mouton ne sont pas parfaitement verticaux. Ensuite, les attaches à la sonnette et diverses circonstances du montage entraînent inévitablement des flexions et des vibrations transversales, dans tous les sens, par rapport à la section transversale des pieux. Peuvent-elles être la cause des fissures observées? Certes, les excentricités rapportées ci-dessus sont faibles, mais les effets d'inertie peuvent aggraver sensiblement la flexion et donner naissance à des extensions. Celles-ci pourraient effectivement, par suite de l'état vibratoire, se développer près des quatre faces latérales du pieu et donner naissance à des fissures complètes. Seulement si on admettait que ces fissures devraient se produire aux ventres de vibrations partielles, la longueur d'onde serait 0 m. 60, ce qui correspondrait

à un harmonique d'ordre $\frac{22,00}{0,60} = \text{env. } 37$, dont la fréquence

serait un multiple important de 4. L'amplification de cet harmonique par le battage rythmé est donc impossible, son amplitude ne peut pas non plus prendre des valeurs suffisantes pour donner naissance aux fissures observées.

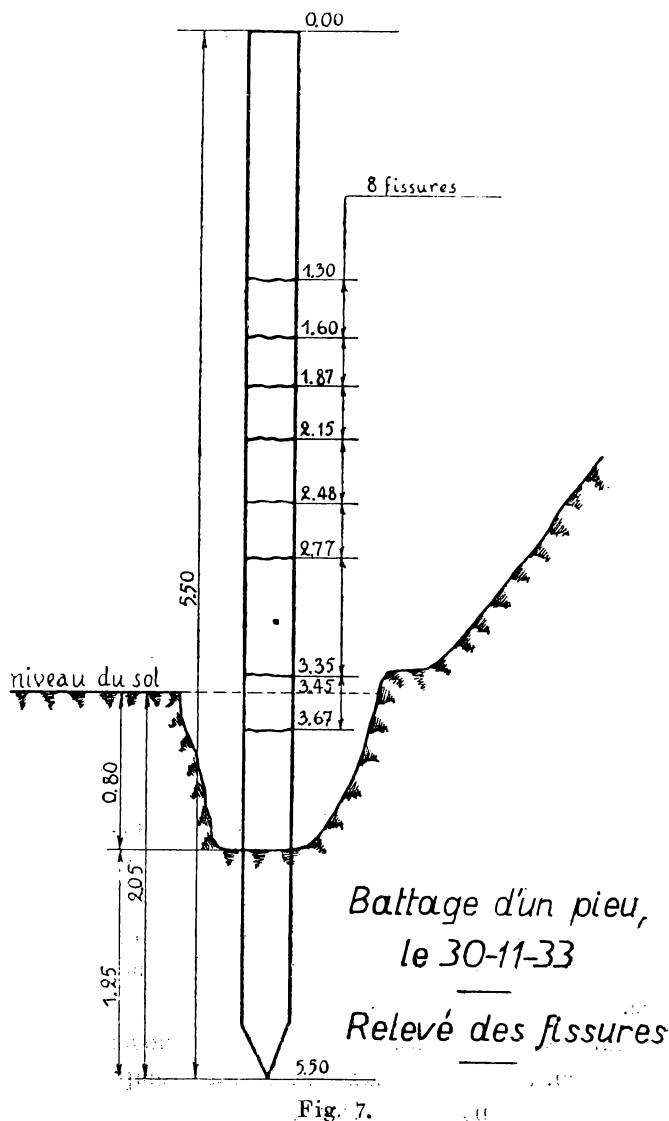


Fig. 7.

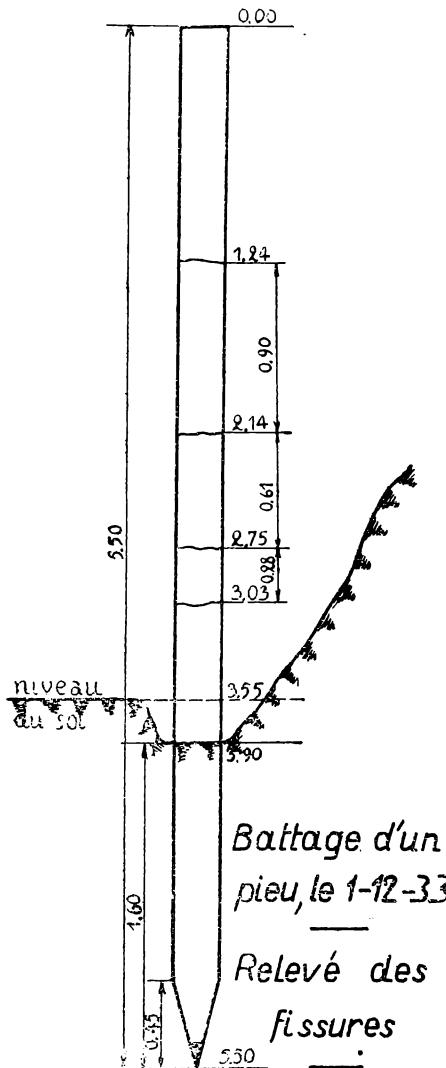


Fig. 8.

1^{er} décembre.

On a fait les observations suivantes le 30 novembre.

On a d'abord battu pendant un certain temps à la cadence moyenne de 85 coups par minute. On a observé à deux reprises

L'amplification possible de la vibration transversale fondamentale ne permettait pas d'expliquer les fissures périodiques peu écartées. Dès lors, on devait se demander si les fissures ne correspondaient pas à une hétérogénéité périodique des pieux. Il ne pouvait s'agir que des étriers. J'avais déjà observé, notamment sur des poutres fraîchement bétonnées par temps très chaud, une fissuration périodique déterminée par la présence d'étriers. Je demandai que l'on vérifiât cette hypothèse. En entaillant le béton à l'endroit des fissures, on reconnut qu'elle était exacte (fig. 2, 3 et 4). C'est donc la présence des étriers qui localise les fissures. La figure 6 reproduit les schémas d'armature des pieux. Les figures 7 et 8 reproduisent le relevé des fissures observées lors des battages du 30 novembre et du

un enfoncement de 10 mm. sous 60 coups. On a battu ainsi jusqu'à un enfoncement de 503 mm. On a ensuite noté les observations suivantes :

Durée de battage en minutes	Nombre moyen de coups par minute	Enfoncement du pieu par périodes de 5' (en mm.)
5	96	67
5	96	52
5	96	45
5	103	31
5	103	29
5	103	38
5	121	70
5	121	85
4	175	204
1	200	204
—	—	—
45		621 mm.

Les trois premières fissures ont été aperçues quelques instants après le commencement du battage, elles étaient distantes entre elles de 0,30 à 0,90. A la fin du battage, on a appliqué la cadence normale de 200 à 240 coups par minute. Après une minute de ce régime, la tête du pieu a commencé à se désagréger (malgré le casque de battage et l'amortisseur) et 5 nouvelles fissures se sont formées, écartées entre elles de 0,30 à 0,60 m. L'enfoncement total réalisé pendant ce battage a donc été de 1124 mm. A ce moment, la fiche totale était d'environ 2 m. 05; le pieu émergeait encore de 3 m. 45 env. La pointe du pieu avait 30 cm. de longueur.

Le 1^{er} décembre, on a observé ce qui suit :

Durée de battage en minutes	Nombre moyen de coups par minute	Enfoncement par périodes (en mm.)
5	73	405
5	83	131
5	94	79
5	97	47
5	165	271

Durée de battage en minutes	Nombre moyen de coups par minute	Enfoncement par périodes (en mm.)
5	185	202
5	176	160
5	151	20
5	171	27
5	167	39
5	205	164
2	177	55
57 minutes		1,600 mm.

A la 57^e minute, le béton de la tête était fortement désagrégé, malgré le casque et l'amortisseur, c'est pourquoi on a arrêté le battage. Les observations ont été faites ici dès le commencement du battage. Une première fissure (à 2,14 env.) est apparue peu de temps après le commencement du battage. Les autres sont apparues pendant le battage à allure normale, peu de temps après que ce régime eût été établi. Il y en a eu quatre au total. La pointe du pieu avait 45 cm. de hauteur. Pendant le battage au ralenti, la vitesse n'est pas uniforme. Il arrive qu'il se produise des volées accélérées de coups, séparées par de petites pauses. Lors du battage normal, le rythme paraît régulier. On aperçoit très nettement les fissures pendant le battage, l'observation du moment de leur formation est plus chanceux. Les faces latérales du pieu sont mouillées par l'eau de condensation du mouton à vapeur. Lorsque les fissures sont formées, elles agissent pendant le battage comme des ventouses et on constate nettement l'aspiration et l'expiration alternées de l'eau, le refoulement étant accompagné de bulles d'air. Pendant les pauses de battage, les fissures apparaissent par une siccité relative sur les parois mouillées, ce qui est dû à l'absorption capillaire de l'eau par la fissure. Après un certain temps de repos, les pieux étant devenus secs, les fissures apparaissent ouvertes de un millimètre environ ; leurs lèvres sont visiblement dégradées par les effets dynamiques (fig. 3 et 4).

Ces fissures sont donc très défavorables ; pendant le battage elles injectent véritablement un mélange agressif d'eau et d'air

sur les étriers et les armatures. Après le battage, elles restent remplies d'eau par la capillarité et peuvent en absorber éventuellement. Il doit en résulter probablement une corrosion progressive des armatures, qui peut désagréger les parties superficielles latérales des pieux, déjà affaiblies par les fissures.

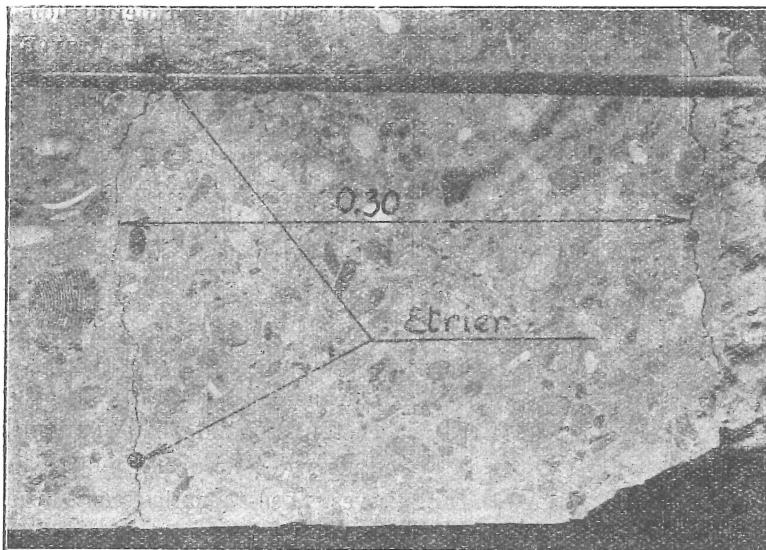


Fig. 9. — Sciage longitudinal en travers d'un groupe de deux fissures.

Un sciage effectué longitudinalement en travers (fig. 9) d'une fissure a montré que celle-ci s'étendait à travers toute la section, dans le plan de l'étrier correspondant. Deux fissures complètes sont d'ailleurs visibles dans cette coupe.

Les raisons de la localisation des fissures au droit des étriers peuvent être les suivantes :

1) Lors du durcissement du béton, les étriers agissent dans la masse qui se contracte comme des chevilles non soumises au retrait. Il en résulte un serrage du béton sur les barres, qui sont soumises à une véritable étreinte et ne se déforment que très peu. Ceci provoque le développement d'extensions dans le

béton, dans la zone périphérique des barres. En milieu indéfini, il est peu probable qu'il se produise des fissures internes. Mais au voisinage d'une surface libre, on conçoit qu'il puisse s'en former ou, du moins, qu'il puisse naître des extensions favorisant la formation de fissures sous l'effet d'autres causes concordantes.

Si l'on considère en élasticité plane un milieu indéfini homogène sans tensions, que l'on y perce un trou circulaire de rayon a et que l'on applique sur la périphérie de ce trou une pression normale uniforme égale à p , on aura, en coordonnées polaires

$$\sigma_r = p \frac{a^2}{r^2}; \quad \sigma_t = -p \frac{a^2}{r^2}; \quad \tau = 0.$$

Donc, à la périphérie du trou, $\sigma_t = -p$ est une extension égale en valeur absolue à l'étreinte p .

Cette théorie élémentaire considère la pression p comme indépendante des déformations. Ce

qui se passe lors du retrait du béton armé dépend naturellement des déformations relatives. Les formules peuvent de ce fait être quelque peu différentes, mais on conçoit qu'il se développe des extensions dans le béton au voisinage des barres (1). Si un étrier est voisin de la surface (fig. 10), on conçoit que l'extension sera maximum suivant la section de moindre résistance ab et qu'une fissure apparente puisse s'y former. On a cru constater quelques fissures acciden-

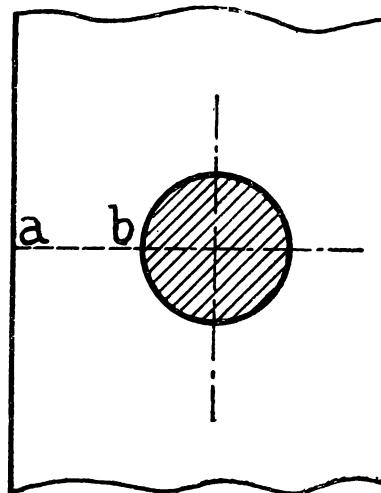


Fig. 10.

(1) Voir à ce sujet une note théorique présentée au 4^e Congrès de Mécanique appliquée, à Cambridge, juillet 1934. Elle établit que la tension maximum d'extension atteint une valeur voisine de celle correspondant à l'empêchement total du retrait.

telles avant battage, plus ou moins développées. Elles correspondaient toutes à des étriers. On n'a observé aucune fissure qui ne fut voisine d'un étrier.

Rapprochant ces observations de celles que j'ai faites en d'autres circonstances, je puis conclure que les étriers isolés créent souvent une *susceptibilité de fissuration causée par un empêchement de retrait*.

2) Lors du battage, des phénomènes de déformation et de tensions divers vont se produire dans le pieu. Les ondes de pression produites par les chocs du mouton donnent lieu à de fortes compressions instantanées dans les sections transversales. Etant plus déformable que l'acier, le béton ne peut de nouveau se déformer librement par compression au voisinage des étriers. Un processus analogue à celui du retrait empêché peut donner naissance dans le béton, au voisinage des étriers, à de nouvelles extensions qui se superposent aux précédentes. Mais il y a plus. Lors de la détente, il se produit une onde d'extension, dont les tensions se superposent aussi à celles qui préexistent du fait du retrait. Elles doivent d'ailleurs être majorées dans les sections passant par les étriers, du fait de la diminution de la section du béton et de la discontinuité introduite. On conçoit aussi que ces ondes d'extension puissent rompre l'adhérence avec les étriers. Si l'on considère maintenant que ces effets sont répétés à une cadence rapide, véritablement vibratoire, on comprend qu'ils puissent être vraiment destructifs.

Somme toute, l'empêchement du retrait crée, au voisinage des étriers, une tension préalable constante, à laquelle se superpose une tension oscillant assez rapidement entre un maximum et un minimum, éventuellement de signes contraires. La sollicitation résultante oscille donc entre un maximum et un minimum d'extension (ce dernier éventuellement renversé de sens, c'est-à-dire une compression). On a affaire à une véritable épreuve d'endurance et l'on sait que le béton ne se prête guère à une telle fatigue en extension.

Ce processus peut expliquer suffisamment la formation de fissures sur tout le tour des étriers, leur formation progressive et le fait que leur nombre augmente toujours et parfois consi-

En admettant la valeur de $m = 6,89$ ci-après déterminée, la section du pieu étant 690 cm^2 et celle de l'acier $7,53 \text{ cm}^2$, la section équivalente serait $734,3 \text{ cm}^2$. Jusqu'à la compression de 273 Kg/mm^2 ramenée à cette section, le prisme est sensiblement élastique et on obtient la valeur moyenne $E = \frac{273}{0,000574} = 476,000 \text{ Kg/cm}^2$.

L'essai sur le prisme non armé de section carrée de 10 cm . de côté et de 20 cm . de hauteur a donné les résultats suivants (fig. 11).

Les déformations sont sensiblement élastiques jusqu'à la compression de 270 Kg/cm^2 . On a en moyenne, jusqu'à cette tension

$$E = \frac{270}{0,000885} = 305,000 \text{ Kg/cm}^2,$$

d'où $m = \frac{2100000}{305000} = 6,89$. On a mesuré les déformations jusqu'à la compression de 360 Kg/cm^2 et la rupture s'est produite à 413 Kg/cm^2 .

La résistance du béton sur cubes eût été plus grande encore, vraisemblablement aux environs de 450 à 500 Kg/cm^2 . Il faut aussi remarquer que l'éprouvette était retirée d'un morceau de la tête du pieu ayant subi l'action d'un battage sans casque amortisseur, ce qui pouvait avoir disloqué la texture du béton. On n'en a cependant constaté aucune apparence.

La moindre déformabilité du béton armé par rapport au béton simple peut s'expliquer comme suit :

1° L'influence du frottement sur les bases des prismes comprimés est plus forte pour le prisme armé, de moindre hauteur relative. Dans les deux cas, on avait cependant placé entre les éprouvettes et les plateaux de la presse des feuilles de fibre comprimée de 1 cm . d'épaisseur, diminuant quelque peu le frottement.

2° Les mesures ont été faites au moyen d'extensomètres Huggenberger mesurant sur 10 cm ., disposés entre deux étriers distants de 10 cm . et à peu près suivant les axes de deux armatures

médianes. Ces armatures ont vraisemblablement diminué la déformation à l'endroit des mesures dans une proportion importante.

3^o On pourrait supposer que les armatures prennent plus d'effort que ne leur assigne le calcul et que tout se passe comme

si m était sensiblement supérieur à $\frac{Ea}{Eb}$. Si l'on accepte la va-

leur Eb du béton non armé, dans la pièce en béton armé, le béton aurait repris $683,5 \times 305,000 \times 0,000574 = 119500$; l'armature aurait repris $734,3 \times 273 = 119500 = 80.500$ Kgr., d'où $m = 61$. Cette valeur est tout à fait excessive et les autres influences, surtout celle qui précède immédiatement, en sont probablement la cause. Si l'on se base au contraire sur le coefficient d'élasticité de l'acier, on trouve comme fatigues des armatures 1207 Kg/cm². L'effort repris par les barres est alors de 9100 Kgr. env., le béton supporte 191.000 Kgr., à quoi correspond une compression moyenne de 277 Kg/cm². La valeur correspondante de m est $4,36$. Elle est plus faible que celle de $6,89$, résultant de l'essai d'élasticité du béton non armé, mais l'écart n'est pas tel qu'il ne puisse s'expliquer par les variations de dilatation du béton armé dues à la présence des armatures.

4^o L'essai d'élasticité sur le béton non armé a été effectué sur une éprouvette extraite du prisme de béton armé, qui avait déjà été chargé à 200 tonnes, soit 273 Kg/cm² en moyenne. Il se peut que son coefficient d'élasticité ait été quelque peu réduit de ce fait.

5^o Enfin, l'armature diminue probablement la déformation du béton surtout au voisinage des armatures.

Quoi qu'il en soit, le béton était très résistant et de bonne qualité. Ce n'est pas l'importance des compressions dues au battage qui a pu produire les fissures. Si l'on se réfère sommairement à la théorie de Barré de Saint-Venant du choc des prismes élastiques, on constate que selon que la base est infiniment rigide ou molle, des compressions importantes peuvent se produire à la base où à la tête du pieu. Dans le cas du battage du pieu à sabot métallique pointu, la résistance est limitée à la base par la force portante du sol; les fatigues de compression y sont

automatiquement limitées et sans doute inférieures au taux d'écrasement, même en tenant compte de l'effet dynamique.

Dans le cas des pieux, la dégradation du béton à la tête, d'observation fréquente, semble indiquer que les compressions sont maxima et brisantes à la tête.

Dans le corps du pieu, les compressions assez fortes ne peuvent produire les fissures que de la manière qui a été indiquée plus haut, c'est-à-dire par l'action de cheville indéformable des étriers et par le renversement de sens des tensions lors des détentes, compte tenu des tensions internes préexistantes éventuelles, provenant du retrait empêché.

Une autre contre-épreuve confirme et précise l'explication donnée et conduit en même temps à d'utiles conclusions au sujet du battage des pieux en béton armé.

Avant que l'on eût procédé au battage par le mouton automatique à vapeur, quelques pieux avaient été enfonceés au mouton ordinaire, dans des conditions au sujet desquelles les informations sont d'ailleurs douteuses. Néanmoins, ces pieux n'avaient pas donné de traces de fissuration. La tête d'un de ces pieux, que j'ai pu examiner le 1^{er} décembre, semblait être affectée d'une très fine fissure près d'un angle dièdre, mais localisée au voisinage de l'arête et ne faisant pas le tour complet du pieu. On m'a affirmé que cette fissure existait avant le battage et n'était qu'une gerçure superficielle, dont elle avait d'ailleurs l'aspect. À ma demande, on a dénudé cette fissure et constaté qu'elle se trouvait au droit d'un étrier.

Après les essais infructueux de battage au moyen du mouton automatique à vapeur, on a battu les pieux au moyen d'un mouton à chute libre, de 850 Kgr., tombant de 2 m. de hauteur, puis de 1 m. 20. Sous le battage d'un pieu au moyen d'une hauteur de chute de 2 m. il s'est produit huit fissures aux étriers. On a alors réduit la hauteur de chute à 1 m. 20. On n'a plus constaté de fissures, malgré un refus très sévère, qui a atteint 10 mm. sous les 30 derniers coups de mouton. La cadence de battage était de 10 à 15 coups par minute en moyenne. La fiche de 5,00 à 5,50 a été atteinte après une durée moyenne de 40 min. à 1 h., plus rapidement que par le mouton à vapeur, qui, nous

l'avons indiqué, ne réalisait en une heure qu'un enfoncement de 1 m. 60. Donc, c'est surtout l'effet de la grande vitesse d'impact plutôt que celui du battage rapide, vibratoire, qui produit la formation des fissures. Le constructeur du mouton à vapeur indique comme hauteur de chute fictive 2 m. 79, ce qui implique une forte vitesse d'impact lors du battage à cadence normale. La cadence ralentie s'obtient par étranglement de la conduite de vapeur, ce qui diminue la pression et la hauteur de chute fictive.

La théorie de Saint-Venant montre caractéristiquement que les compressions maxima sont plus fortement influencées par la hauteur de chute que par la masse du mouton. Pour une barre fixée sur une base inébranlable, Saint-Venant a établi comme formule de la pression maximum sous l'effet d'un choc longitudinal

$$p = 2 E v \sqrt{\frac{\Delta}{Eg}} \left(1 + l \right)^{-\frac{2P}{Q}}$$

lorsque $\frac{Q}{P} < 5$, v est la vitesse d'impact ($v = \sqrt{2gH}$, H étant la hauteur de chute), Q est le poids du mouton et P le poids du pieu.

Si nous appliquons cette formule aux pieux en question, dont le poids est 875 Kgr., elle devient

$$p = 8.86 \times 10^2 \sqrt{H} \left(1 + \frac{1}{2.72 \frac{1750}{Q}} \right) \text{ kg./cm}^2$$

Si $Q = 185$ Kgr. et $H = 2,79$ (mouton vibrant), $p = 1480$ Kg./cm^2 .

Si $Q = 850$ Kgr. et $H = 2,00$ (mouton ordinaire), $p = 1410$ Kg./cm^2 .

Si $Q = 850$ Kgr. et $H = 1,20$ (mouton ordinaire), $p = 1093$ Kg./cm^2 .

Naturellement, la base du pieu n'étant pas inébranlable, les pressions ne sont pas aussi élevées. Les valeurs ci-dessus indiquées produiraient des forces de 700 à 1000 tonnes environ à la pointe des pieux, ce qui est impossible. Les pressions réelles seront donc sensiblement moindres, mais il est très plausible que l'influence relative de la hauteur de chute n'en est nullement

atténuée, au contraire. La formule de Saint-Venant, qui n'est appliquée qu'à titre de comparaison, corrobore cependant parfaitement les résultats défavorables du battage rapide au mouton automatique à vapeur et ceux du battage au mouton ordinaire sous 2 m. de chute. Il est à noter que si les effets du mouton à vapeur ne sont pas plus défavorables que ceux du mouton ordinaire sous 2 m. de chute, c'est que le choc de la masse frappante de 185 Kgr. n'est pas directement transmis au pieu coiffé du casque de battage, mais s'exerce sur le mouton de 1400 Kgr. formant cylindre et porté par le pieu, ce dont il a été tenu compte dans le calcul.

Ces conclusions sont confirmées par les premiers résultats des essais entrepris par la Building Research Station anglaise à la demande de la Fédération des Entrepreneurs anglais. Les épreuves ont été faites sur des colonnes en béton armé reposant sur une base ferme et soumises à des coups de mouton. Des tensions de 100 à 200 Kg/cm² ont été relevées sous le choc d'un mouton de près de 500 Kgr. tombant de 15 cm. On a constaté la destruction beaucoup plus rapide des pieux sous l'effet des grandes hauteurs de chute. Le rapprochement des étriers augmentait la résistance; l'écartement ne dépassait pas 7,5 cm. L'emploi de flettes ne donnait pas de résistance supérieure à celle des étriers également rapprochés. Aucun rapprochement n'est fait entre la position des fissures et celle des étriers; on a constaté seulement que les fissures se produisaient sur toutes les faces des pieux et plus vite dans les pieux dont le dosage en ciment était plus riche (ce qui fait présumer l'influence du retrait). (Voir *Report of the Building Research Board for the year 1932*, Londres, 1933.)

Donc, la hauteur de chute du mouton agit comme élément essentiel de destruction des pieux au battage. C'est la vitesse d'impact qui est le facteur le plus dangereux d'ébranlement. La répétition rapide, qui produit l'effet de fatigue, n'intervient probablement qu'en second ordre. La multiplication des fissures, lorsque l'on accélère le battage, peut provenir tout autant de l'augmentation de la hauteur fictive de chute que du rythme plus rapide de battage.

Les résultats favorables du battage au mouton ordinaire sous chute modérée ont montré que l'on ne pouvait mettre en cause la résistance du terrain, qui est assez grande par endroits, mais pas excessive. La mise en fiche se faisait sans fissures, en un temps normal et avec un refus très dur. Aucun des pieux fissurés n'a été battu jusqu'au refus et mis complètement en fiche au moyen du mouton automatique à vapeur, malgré un battage prolongé.

Ceci prouve pertinemment que l'énergie mise en œuvre dans ce battage n'exerce qu'un faible effet utile et que sa majeure partie est dissipée en travail nuisible de destruction du pieu et en autres travaux inutiles, sinon désavantageux. Toutes ces conclusions confirment l'opinion classique que le battage des pieux doit se faire de préférence au moyen d'un mouton lourd à faible hauteur de chute. On recommande généralement que le mouton ait un poids au moins égal à celui du pieu. Les pieux en question pèsent environ 875 Kgr. Le mouton de 850 Kgr. était donc approprié.

Je n'ai jamais constaté le développement de fissures dans des pieux en béton armé battus d'après ce principe sur les chantiers que j'ai connus. Plusieurs personnes m'ont confirmé dans cette opinion. Il doit bien être entendu que l'on peut assimiler les moutons à vapeur lourds, à simple action et à battage lent, au mouton ordinaire au point de vue des effets du battage. La hauteur de chute de ces moutons est généralement modérée.

Depuis quelques années, les moutons à vapeur à double action, automatiques, sont beaucoup employés, notamment pour l'enfoncement et l'arrachement des palplanches. Leurs constructeurs invoquent en leur faveur la rapidité du battage, qui anime le pieu de vibrations régulières diminuant l'adhérence du sol et facilitant l'enfoncement. Ils allèguent aussi que, par suite de la rapidité du battage, le mouvement d'enfoncement est continu et que, de la sorte, la puissance est presque entièrement utile. Ils estiment que l'énergie produite par un poids relativement faible et une hauteur de chute réduite est de nature à diminuer la déformation des têtes des pieux et palplanches.

Les derniers points sont incontestablement erronés. D'abord

les hauteurs de chute fictives de l'ordre de 3 m. ne sont pas modérées, mais fortes. Le rendement du choc d'un marteau léger animé d'une grande vitesse est moindre que celui d'un marteau lourd à faible vitesse. La théorie élémentaire du choc suffit à le faire comprendre. Une expérience non moins élémentaire le prouve : lorsque l'on chasse un clou dans une matière très dure au moyen d'un marteau léger manié à la volée, le travail utile est quasi nul ; la majeure partie du travail, qui sert à la déformation élastique, est restituée par le choc en retour, tandis qu'une part importante de l'énergie sert à déformer le clou. La formule hollandaise indique que le rendement du battage est indépendant de la hauteur de chute et proportionnel au poids du mouton. En admettant que la formule hollandaise soit inexacte pour les moutons donnant de faibles enfoncements par coup, toutes les corrections que l'on peut envisager prouvent cependant que l'avantage de rendement reste aux moutons lourds.

Un diagramme fourni par le constructeur du mouton automatique à vapeur de 1400 Kgr., employé pour battre les pieux dont il est question dans cette note, indique que les charges utiles sont de

900 7500 et 26.000 Kgr.

lorsque l'enfoncement par coup est de

100 mm. 10 mm. et 1 mm.

Ces chiffres résultent d'un diagramme basé sur une formule empirique du type de la formule hollandaise corrigée ou de l' « Engineering News Record ». Quoique sujets à caution, ils indiquent nettement la diminution du rendement lorsque l'enfoncement diminue ; la part du travail de déformation élastique ou permanente ne cesse de croître. Ce résultat se marque d'autant plus vite que le mouton est plus léger.

L'expérience, confirmant le raisonnement, prouve que les moutons lourds à faible hauteur de chute dégradent le moins les têtes de pieux et que l'augmentation de la hauteur de chute est dangereuse.

L'observation du battage rapide des pieux en béton armé montre, par la « respiration » des fissures, que le pieu n'est pas en état de régime continu, mais bien en état vibratoire, c'est-à-dire très rapidement et fréquemment variable. Il en est de

même de l'enfoncement. Les effets d'inertie sont maximums. Enfin, l'expérience et les déductions précédentes montrent que les fortes hauteurs de chute et l'état vibratoire ne conviennent précisément pas aux pieux en béton armé, mais y produisent des fissures et d'autres dégradations.

Ce n'est pas la première fois que j'ai été informé que des pieux en béton armé s'étaient fissurés lors du battage. Il m'a été rapporté, il y a quelque temps, que des incidents analogues s'étaient produits lors du battage de pieux en béton armé dans un important chantier situé non loin de celui où ont été observés les faits relatés ci-dessus. J'ai entendu à l'époque attribuer les fissures à la qualité du béton. Je n'ai pas eu d'informations précises sur ce cas ; je puis seulement présumer que le terrain était le même que celui de la station de pompage de Sclessin. J'ignore de quelle manière se faisait le battage, mais j'imagine qu'en elle résidait encore la vraie cause des dégradations constatées. Il serait certes intéressant de réunir les observations que l'on aurait pu faire dans des cas semblables. Il n'est pas certain que ces incidents ne se reproduisent plus.

La formation professionnelle des chefs de chantier et des entrepreneurs n'est plus toujours basée sur une pratique suffisante. Le prestige des vieilles règles empiriques est évanoui ; on tend dangereusement à y substituer la pseudo-science livresque. La tendance au développement du machinisme dans les travaux publics fait aussi souvent dominer la vogue sur le bon sens et la raison. Préférer le mouton ordinaire à treuil au mouton automatique à vapeur donne l'apparence d'être vieux-jeu. D'ailleurs les prospectus et catalogues affirment si impudemment des erreurs manifestes et l'esprit critique a tellement fait place à un certain engouement que la démonstration un peu insistante que j'ai faite ci-dessus me paraît bien nécessaire. Je suis convaincu que des affirmations plus sommaires eussent rencontré beaucoup de scepticisme.

Concluons donc par l'avis qu'il reste établi que le meilleur résultat pour le battage des pieux s'obtient en employant des moutons lourds à faible hauteur de chute. L'élément le plus dangereux au point de vue des déformations des pieux est la hauteur de chute. Cela est vrai surtout pour les pieux en béton

armé, dont la résistance s'accommode mal des effets des chocs. La cadence rapide du battage au moyen du mouton automatique convient aussi mal aux pieux en béton armé, qu'elle soumet à une sorte d'épreuve d'endurance. Ces dernières observations ne s'appliquent naturellement qu'aux pieux moulés avant battage, non aux pieux moulés dans le sol.

Il convient aussi d'insister sur le rôle défavorable joué dans le processus de la fissuration par les étriers isolés et assez écartés, tandis que les étriers assez rapprochés semblent y échapper. Il est donc recommandable de substituer aux étriers isolés une espèce de fretté légère, à spires assez rapprochées. Elle se met en place très facilement en étirant sur l'ensemble des armatures longitudinales un rouleau de fil plutôt mince (de 3 à 5 mm. par ex.), de telle sorte que les spires ne soient guère écartées nulle part de plus de 8 à 10 cm. et moins encore aux extrémités du pieu (en général de moitié). Ce système, à la fois pratique et économique, augmente certes la sécurité contre la fissuration. Peut-être du treillis métallique peut-il convenir, mais il faut prendre garde à la séparation possible de l'enveloppe extérieure, comme dans les pièces en béton fretté. D'une manière générale, on emploiera des barres d'armatures aussi fines que possibles et couvertes d'une bonne épaisseur de béton.

Enfin, en cas de terrain assez dur, il semble avantageux, au point de vue de la sollicitation du pieu, de le pourvoir d'une pointe effilée. Il convient toutefois de considérer si cette forme est favorable au point de vue de la force portante, eu égard à la nature du terrain. Ce point de vue peut être considéré comme accessoire si l'on s'inspire des règles précédentes qui doivent permettre, même si la pointe est obtuse, de battre les pieux au refus sans dommages.

En terminant, je m'acquitte du devoir d'exprimer mes remerciements à M. Biefnot, Directeur gérant de l'Association intercommunale de démergement des communes riveraines de la Meuse en amont de Liège, qui m'a procuré un grand nombre des renseignements contenus dans cette note, ainsi que les photographies qui l'illustrent et à la compétence éclairée de qui je dois d'avoir pu faire ces observations.
