

Y. VENEC  
Technicien Electronicien

J. MENU  
Assistant  
Chef de Groupe

Laboratoire Régional de Blois

# contrôle de la continuité des pieux par une méthode d'auscultation dynamique

## P R E S E N T A T I O N

M. CHAMPION  
Ingénieur des T.P.E.  
Directeur du Laboratoire

*La vérification des pieux en béton hydraulique utilisés pour les fondations des ouvrages d'art et des bâtiments est un problème souvent posé par les ingénieurs.*

*Partant de travaux effectués il y a quelques années par M. BRUNETTI, Assistant au Laboratoire Central et d'une certaine expérience acquise par le Laboratoire Régional de Blois, en matière d'auscultation dynamique des bétons, MM. MENU et VENEC ont apporté des perfectionnements de détail, améliorant ainsi sensiblement cette méthode de contrôle.*

*Des exemples sont donnés, montrant dans certains cas les bons résultats obtenus.*

*Toutefois, l'exploitation des oscillogrammes reste délicate et leur interprétation doit être encore considérée avec prudence.*

*Aussi, les auteurs de l'article souhaitent recevoir de nombreuses demandes d'interventions de la part des ingénieurs responsables de chantiers, en vue de faire progresser cette technique par le plus grand nombre possible d'applications.*

### INTRODUCTION

L'auscultation dynamique des pieux en béton hydraulique a fait l'objet de divers travaux de nombreux chercheurs. Il s'agit d'une technique de mesure non destructive d'emploi très séduisant, mais qui présente certaines difficultés d'exploitation.

Cette technique n'est pas nouvelle et elle a déjà fait l'objet de nombreuses études et publications.

C'est ainsi que, lors des « Journées des Fondations » de mai 1963, D. Beylich, Chef de la Section Electronique au Laboratoire Central, a présenté d'importants travaux de recherche sur le contrôle des pieux, ayant pour base de méthode le phénomène d'écho acoustique [1].

Dans un article du Bulletin de Liaison, relatif à l'auscultation des bétons, M. Brunetti, Assistant à

la Section Electronique du Laboratoire Central a, de nouveau, envisagé l'emploi de ce procédé [2].

M. J. Paquet, Chef de la Section Electronique au Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics, dans une publication de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics en 1968, dans une analyse sous le titre « Application au contrôle : méthode d'écho » a montré un certain nombre de difficultés rencontrées sur chantier [3].

Enfin, M. Matthew J. Golis, de l'Université de l'Ohio, publiait, en juin 1968, un article sur la « Mesure de l'épaisseur des dalles par une méthode d'impulsions ultrasoniques » [4].

Depuis février 1968, le Laboratoire Régional de Blois a eu pour mission de rechercher un perfectionnement de la méthode afin de pouvoir l'appliquer à des pieux en béton de caractéristiques différentes.

## THEORIE DE BASE

La méthode utilise le phénomène de l'écho d'impulsion. Si un choc est transmis à une particule, elle entre en vibration tout en transmettant à la particule voisine une partie de l'énergie qui lui a été fournie, c'est ainsi que se propage le phénomène d'onde. Lorsque cette onde arrive sur une surface qui sépare deux matériaux de caractéristiques acoustiques différentes, une partie de l'énergie est transmise au second matériau, et l'autre partie est réfléchiée sur cette surface ; cette énergie réfléchiée se propage vers le point d'émission.

La mesure du temps qui sépare l'émission du choc de la réception de l'énergie réfléchiée permet de déterminer, lorsque la vitesse de propagation est connue, la longueur du trajet parcouru, et, par conséquent, la distance de la surface qui a provoqué la réflexion.

### EQUATION DU MOUVEMENT DE LA PARTICULE

La particule ainsi sollicitée se déplace autour de sa position d'équilibre par des oscillations sinusoïdales amorties par frottement visqueux.

L'équation du mouvement de la particule s'écrit :

$$s = A \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

A : amplitude initiale

$\lambda$  : constante d'amortissement

t : temps

$\omega$  : pulsation

Le mouvement est dit sinusoïdal exponentiellement amorti (fig. 1 et 2).

### PROPRIETES DE L'ONDE LONGITUDINALE

Elle se propage en ligne droite dans le solide avec une vitesse « v », telle que :

$$v = \frac{ds}{dt}$$

Elle se réfléchit à la surface de séparation des milieux ayant des résistances acoustiques décroissantes. La résistance acoustique spécifique du matériau est le produit de la masse spécifique du matériau par la vitesse de propagation de l'onde longitudinale :

air :  $\rho \cdot v = 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 330 \text{ m/s} = 400 \text{ kg/m}^2/\text{s}$

eau :  $\rho \cdot v = 10^3 \text{ kg/m}^3 \times 1400 \text{ m/s} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$

A ces résistances acoustiques est associé un coefficient K appelé facteur de réflexion. Si R est le rapport des résistances acoustiques des deux matériaux en contact, on donne les relations suivantes entre K et R [5] (fig. 3).

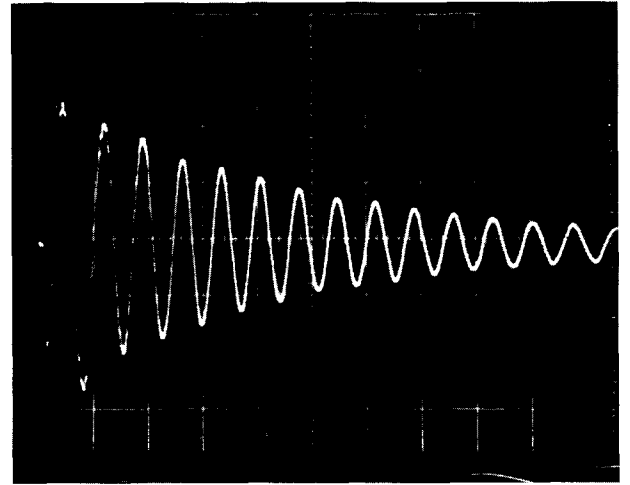


Fig. 1

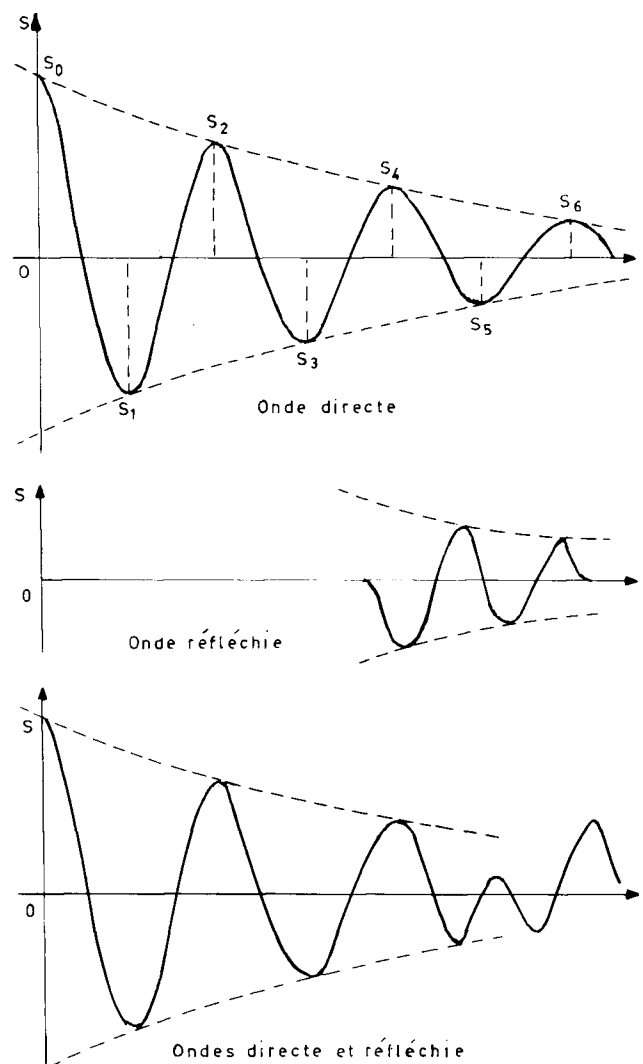


Fig. 2

Mouvement d'une particule écartée de sa position d'équilibre.

K	0	0,1	0,25	0,35	0,45	0,67	0,82	0,90	0,99
R	1	2	3	4	5	10	20	40	100

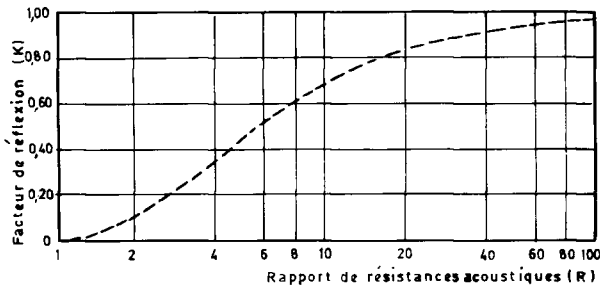


Fig. 3 - Relation entre le coefficient K ou facteur de réflexion et le rapport des résistances acoustiques R.

Le facteur de réflexion K est le rapport des quantités d'énergie réfléchi et incidente ; il s'exprime aussi en fonction des résistances acoustiques :

$$K = \frac{E_r}{E_i} = \left[ \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \right]^2$$

$\rho_1 V_1$  : résistance acoustique du premier milieu

$\rho_2 V_2$  : résistance acoustique du second milieu

$E_r$  : énergie réfléchi

$E_i$  : énergie incidente

Lorsque l'onde longitudinale se déplace, il a été constaté une diminution des hautes fréquences au fur et à mesure que la distance parcourue augmente (fig. 4 et 5).

Après réflexion, si la surface sur laquelle a eu lieu la réflexion est libre, par exemple une extrémité du pieu non ancré, le signal d'écho est de même signe que l'onde directe. Si la surface est liée, dans le cas d'un pieu ancré, le signal d'écho est de signe contraire (fig. 6 et 7).

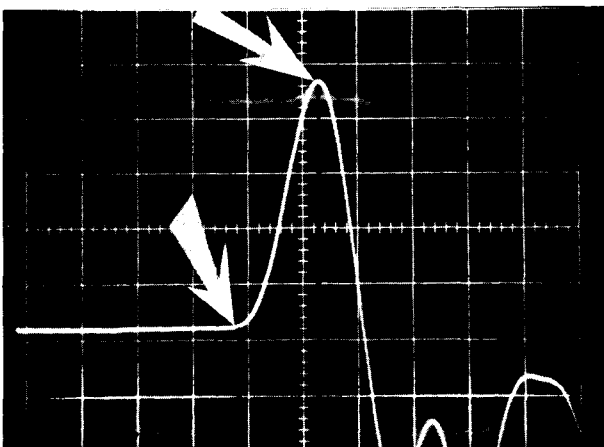


Fig. 4 - Temps de montée : 25 microsecondes.

La vitesse de l'onde réfléchi est identique à la vitesse de l'onde incidente, puisque les particules de matériau mises en jeu sont les mêmes.

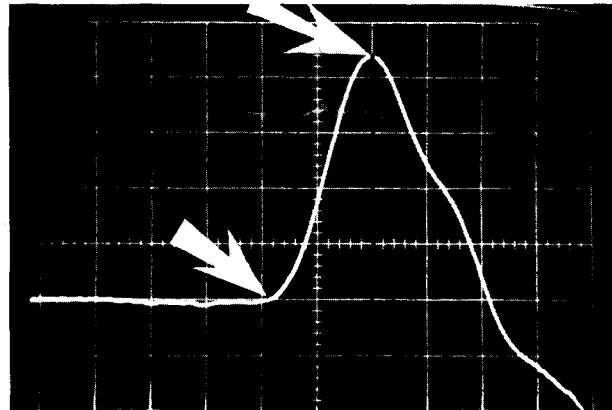


Fig. 5 - Temps de montée : 40 microsecondes.

Nota : Les figures 4 et 5 représentent les formes des impulsions reçues après 30 et 60 cm de parcours. Le temps de montée de l'impulsion de la figure 4 est plus court que le temps de montée de l'impulsion de la figure 5.

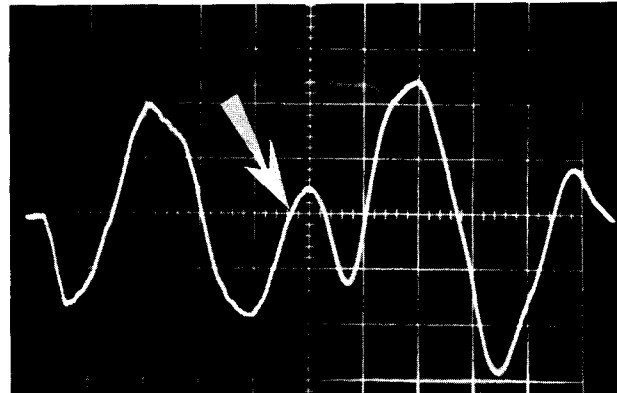


Fig. 6 - Pieu à extrémité libre. Ce pieu est acoustiquement isolé ; le signal d'écho est de même signe que le signal direct (le signal direct est obtenu par une mesure en transparence sur un béton identique).

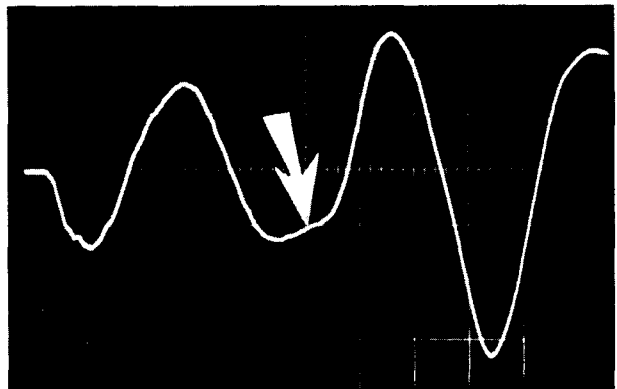


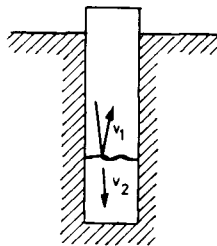
Fig. 7 - Pieu à extrémité liée. Le signal d'écho est opposé au signal direct.

## COMPOTEMENT D'UNE ONDE LONGITUDINALE EN PRESENCE D'ANOMALIES

Le comportement d'une onde longitudinale en présence d'anomalies a été analysé par le Docteur Jones [6]. Nous avons pu vérifier un certain nombre de phénomènes que nous donnons ci-après comme exemples.

### Interfaces dues à des hétérogénéités au fond d'un pieu

Lorsque l'onde longitudinale arrive sur une interface séparant les zones de bétons de résistances acoustiques différentes, ou encore sur une fissure, il se produit en général quatre ondes résultantes :



- une onde longitudinale réfléchie de vitesse  $V_1$ ,
- une onde longitudinale réfractée de vitesse  $V_2$ ,
- une onde de cisaillement réfléchie, très faible,
- une onde de cisaillement réfractée, très faible.

La répartition des énergies dépend des vitesses et des masses spécifiques des deux milieux, ainsi que de l'angle sous lequel l'onde initiale frappe l'interface.

Une onde longitudinale sous incidence normale produit une énergie réfléchie maximale.

A titre d'exemples, nous citons quelques valeurs du facteur de réflexion  $K$  pour des interfaces séparant des milieux, tels que béton-air, béton-calcaire et béton-béton et déterminées avec la formule

$$K = \left[ \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \right]^2 \quad \text{déjà citée}$$

#### Premier exemple

Le pieu comporte deux zones de béton de vitesses différentes  $V_1$  et  $V_2$ , mais de masses volumiques considérées identiques.

L'énergie réfléchie est faible, et le signal d'écho sur la figure 8 est très peu visible.

C'est le cas, ici, d'un pieu comportant deux qualités de béton, le meilleur béton étant en tête de pieu.

#### Deuxième exemple

Le pieu a une interface béton-matériau de fond de fouille.

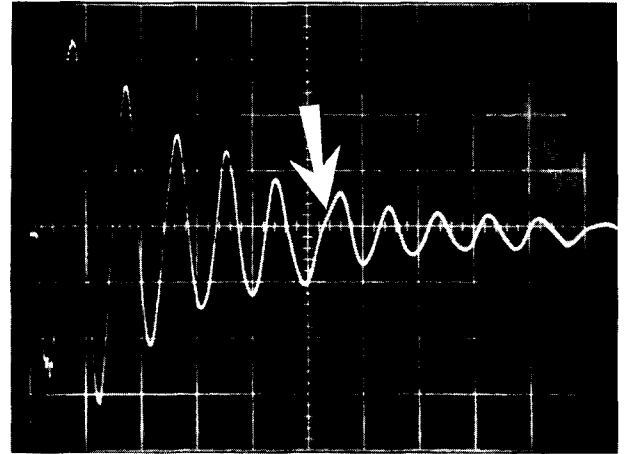


Fig. 8 - Bétons de qualité différente.  
 $\rho_1 = \rho_2 = 2,3 \text{ kg/dm}^3$  -  $V_1 = 4500 \text{ m/s}$   
 $V_2 = 3500 \text{ m/s}$  -  $K = 1,5 \%$

On est en présence de matériaux de vitesse et de masse volumique différentes.

20 % de l'énergie sont réfléchis, et le signal d'écho est bien visible (fig. 9).

Ici, c'est le cas d'un pieu battu et encasté dans une roche tendre du tuffeau de Touraine.

#### Troisième exemple

Il s'agit ici d'une interface béton-air. Les vitesses de son et les masses volumiques sont très différentes.

La réflexion est presque totale puisque 99 % de l'énergie de l'onde incidente sont réfléchis et le signal d'écho est maximal (indiqué par la flèche 1, fig. 10). Le signal d'écho est répété (voir flèche 2).

Ici, c'est le cas d'un pieu préfabriqué ausculté avant son battage.

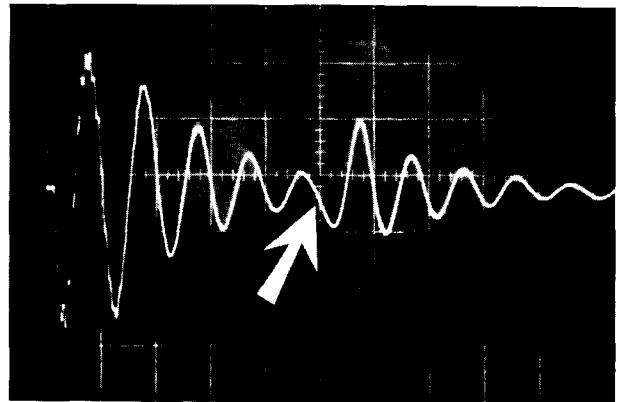


Fig. 9 - Interface béton-calcaire.  
 $\rho_1 = 2,3 \text{ kg/dm}^3$  -  $V_1 = 4500 \text{ m/s}$   
 $\rho_2 = 2,0 \text{ kg/dm}^3$  -  $V_2 = 2000 \text{ m/s}$  -  $K = 20 \%$

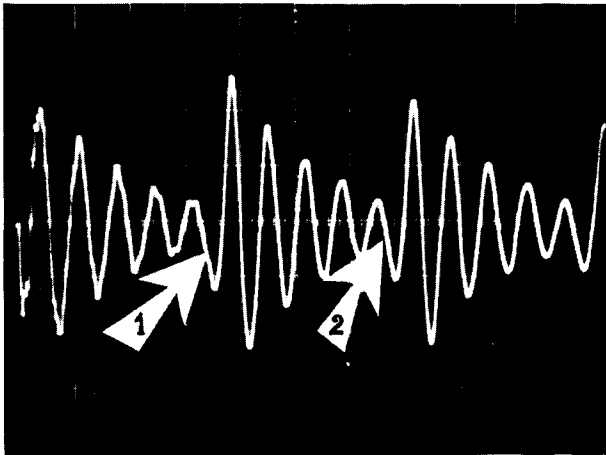


Fig. 10 - Interface béton-air.

$$\rho_1 = 2,3 \text{ kg/dm}^3 - V_1 = 4500 \text{ m/s}$$

$$\rho_2 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/dm}^3 - V_2 = 330 \text{ m/s} - K = 99 \%$$

## LES FISSURES

### Interface due à une fissure

Lorsque l'onde longitudinale rencontre une fissure, il y a réflexion d'une partie de l'énergie et de multiples réfractions, qui diminuent la vitesse de propagation et qui augmentent la durée de l'impulsion transmise. Après la réflexion, le temps de montée pour atteindre le maximum d'amplitude est plus grand que dans le cas de l'onde incidente. Le signal obtenu apparaît sur la *figure 11* moins aigu [5].

### Effets des vides et cavités

Lorsqu'une impulsion ne pénètre pas directement au travers d'une fissure, il est possible qu'elle se propage de l'autre côté par simple diffraction autour des limites du défaut.

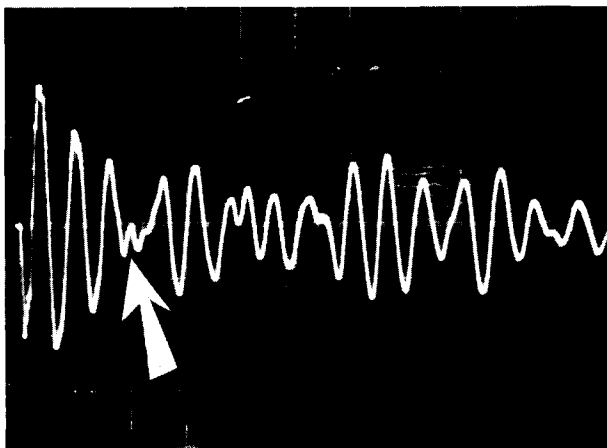


Fig. 11 - Signal d'écho.

Une impulsion qui traverse un matériau contenant un grand nombre de vides sera diffractée de nombreuses fois, et elle parcourra un chemin plus long.

Lorsque l'impulsion rencontre une grande cavité, telle qu'un vide ou un béton caverneux de résistance acoustique très inférieure, la diffraction autour de l'anomalie augmente le temps de parcours par rapport au temps théorique. La vitesse constatée sera donc inférieure à celle mesurée sur échantillon sans défaut.

Dans ces cas, il n'y a pas d'observation d'écho.

Les différences de vitesses permettent de détecter la présence des défauts, mais il n'est pas possible de les localiser.

## LA METHODE DE MESURE

Le mouvement vibratoire d'une particule de béton située à la tête du pieu est traduit électroniquement sur un oscilloscope et enregistré par photographie.

Cette particule est mise en mouvement de deux manières :

- une impulsion directe lui est transmise et provoque sa vibration,
- la réflexion de cette même impulsion sur une interface la sollicite une seconde fois.

La mesure du temps séparant l'émission de l'impulsion de l'instant où cette impulsion sollicite la particule après réflexion nous permet de calculer la distance parcourue.

Un pieu peut être ainsi examiné et un résultat donné dans un temps maximal de 30 minutes (*fig. 12*).

## LE MATERIEL UTILISE

La chaîne de mesure comprend un émetteur de chocs, un capteur de vibrations et un ensemble d'enregistrement constitué d'un oscilloscope et d'une caméra.

### L'émetteur de chocs

L'émetteur de chocs se compose d'une pointe en acier très dur sur laquelle vient frapper un noyau d'acier. Ce noyau d'acier est placé au centre d'une bobine qui reçoit des impulsions électroniques, provenant d'une bascule à transistors (*fig. 13 et 14*).

Sur l'axe de la bobine est placé un quartz de synchronisation. Le signal fourni par cet élément déclenche le fonctionnement du système de lecture et d'enregistrement.

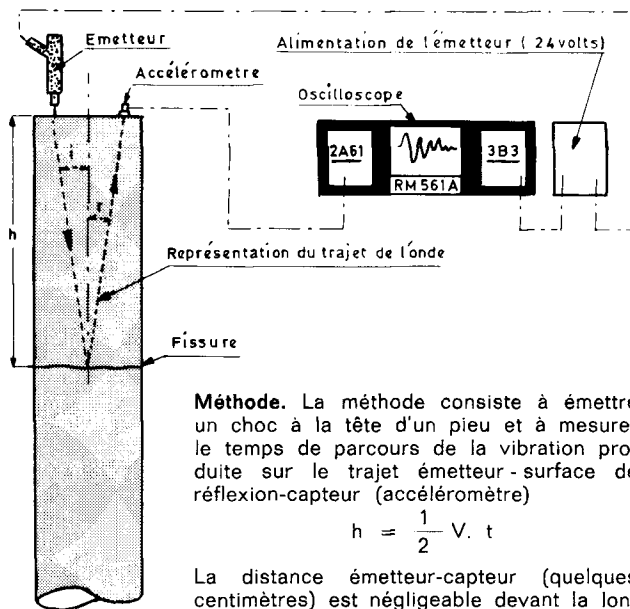


Fig. 12 - Schéma de principe des mesures sur pieux.

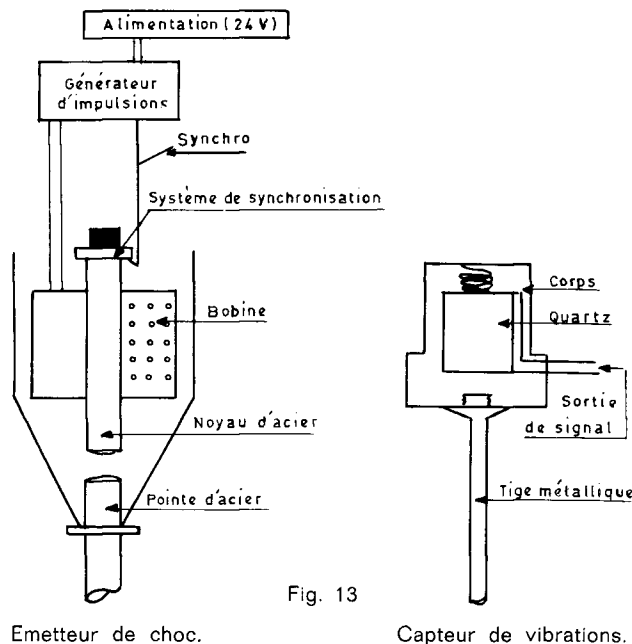


Fig. 13

Cet émetteur de chocs conçu par le L.C.P.C. a été amélioré par ce dernier dans le sens d'une plus grande résistance mécanique et par une augmentation appréciable de sa puissance.

Toutefois, la profondeur d'investigation reste limitée aux pieux inférieurs à 15 mètres de longueur.

#### Le capteur de vibrations

Nous avons choisi comme capteur de vibrations un appareil fabriqué par Bruel et Kjaer.

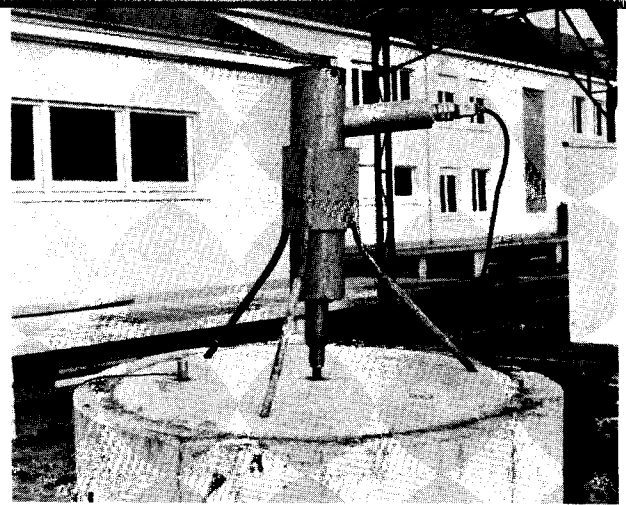


Fig. 14 - Emetteur de choc et capteur de vibrations en position d'essai.

Il s'agit d'un accéléromètre placé à l'extrémité d'une tige de titane de 6 cm de longueur.

Il est constitué par un quartz piézo-électrique qui transforme toute contrainte mécanique ou pression en une tension électrique.

L'ensemble d'enregistrement est constitué par un oscilloscope Tektronix (RM 561 A), déjà utilisé en auscultation dynamique auquel nous avons ajouté une caméra C 12 RS (fig. 15) fabriquée par Tektronix.

L'oscilloscope reçoit les tensions fournies par le capteur de vibrations. Ces tensions sont visualisées sur l'écran de l'appareil. La courbe est photographiée à l'aide de la caméra. Un dos « Polaroid » permet immédiatement le développement et l'interprétation (fig. 15).

#### EXECUTION DE LA MESURE SUR UN PIEU

L'émetteur et le capteur sont placés perpendiculairement à la tête du pieu à quelques centimètres l'un de l'autre.

L'oscilloscope reçoit l'information en provenance du capteur. L'opérateur observe la courbe obtenue et repère les positions des échos sur l'écran.

Il faut procéder au déplacement de l'émetteur et du capteur afin d'obtenir une bonne réception. En effet, des échos parasites peuvent se superposer et il est nécessaire de s'assurer de la fidélité de l'écho repéré.

La caméra permet de photographier le signal jugé représentatif parce que ne variant pas, et cela après plusieurs essais.

#### DETERMINATION DE LA VITESSE DE REFERENCE DE PROPAGATION DU SON DU MATERIAU

Cette mesure est effectuée par transparence sur les éprouvettes du béton du pieu. Ces éprouvettes peuvent être, soit celles du prélèvement lors du bétonnage, soit découpées sur une carotte.

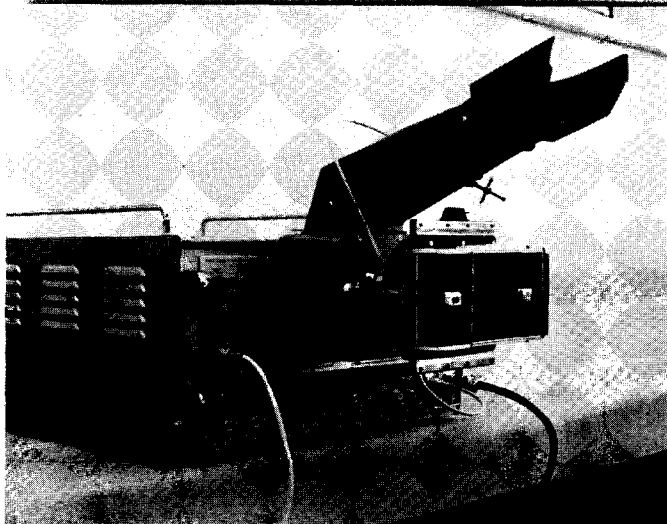


Fig. 15 - Oscilloscope - Polaroid.

## INTERPRETATION ET EXPLOITATION DE L'OSCILLOGRAMME

L'oscillogramme est une courbe sinusoïdale plus ou moins perturbée. Il y a d'abord une première oscillation et son enveloppe est une courbe exponentielle. Lorsque l'onde réfléchie arrive au capteur au bout du temps  $t$ , il y a nouvelle oscillation ; la première oscillation n'étant pas terminée, on observe à cet instant la composition des mouvements provoqués par le choc direct et le choc réfléchi.

Sur la figure 16, partant d'un oscillogramme, on a représenté une courbe enveloppe. L'échelle semi-logarithmique adoptée permet d'obtenir une droite jusqu'à l'instant où apparaît le retour du choc.

Les temps «  $t$  » exprimés en microsecondes sont déterminés entre l'émission du choc et sa réception après réflexion. La hauteur  $h$  séparant la surface d'émission de la surface de réflexion est relevée graphiquement. C'est la distance séparant le zéro du temps moyen des alternances au retour du choc.

### Remarques :

Les phénomènes parasites observés sur la courbe se manifestent par des déformations dont la position varie en fonction de l'emplacement des émetteur et capteur. Dans l'exploitation de l'oscillogramme, il faut les éliminer.

Ils se représentent par :

— des signaux haute fréquence superposés à la sinusoïde amortie — une modulation basse fréquence de la référence zéro, avec des engins de chantiers, tels que : pelles mécaniques, groupes électrogènes, etc. — des petites réflexions dues à des micro-fissurations dans le béton de la surface supérieure du pieu qui surviennent notamment lors du récépage.

A ce sujet, on a constaté qu'un récépage attaqué horizontalement était bien moins perturbateur pour la qualité du béton du pieu qu'une attaque verticale.

### Précision de la mesure

Lorsqu'il y a plusieurs échos, les distances qui sont données par les échos d'ordre supérieur à 1, sont

plus grandes que les distances réelles. Ceci est dû au fait que les anomalies qui intéressent toute la section du pieu provoquent un ralentissement qui est fonction de leur importance.

On a calculé que l'ordre de grandeur de la précision du matériel est de 5 %.

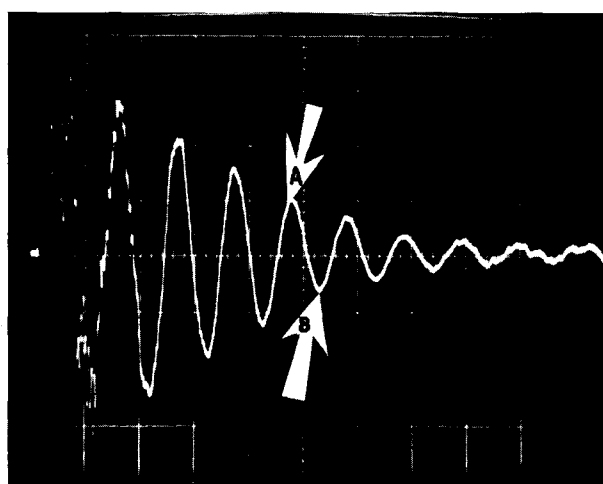
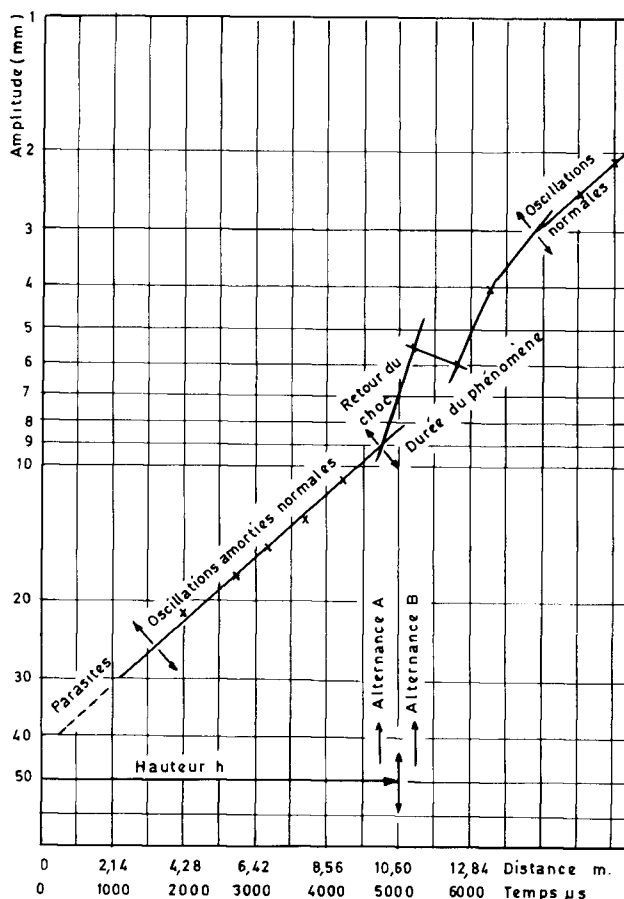


Fig. 16 - Exploitation d'un oscillogramme.

**Pieu sans défaut**

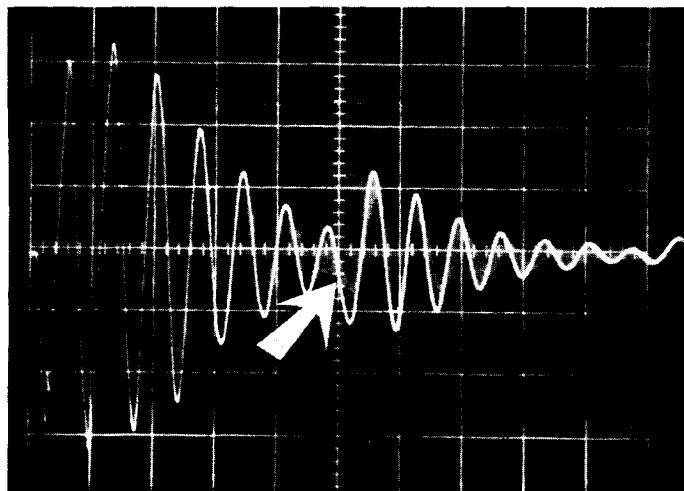
Pieu foré, ferrailé, non chemisé.

Vitesse  $V = 4\,000$  m/s (mesurée sur éprouvettes d'un prélèvement).

Temps mesuré  $t = 5\,000$   $\mu$ s.

Longueur théorique  $h' = 9,9$  m.

Longueur calculée  $h = 1/2 Vt = 10$  m.



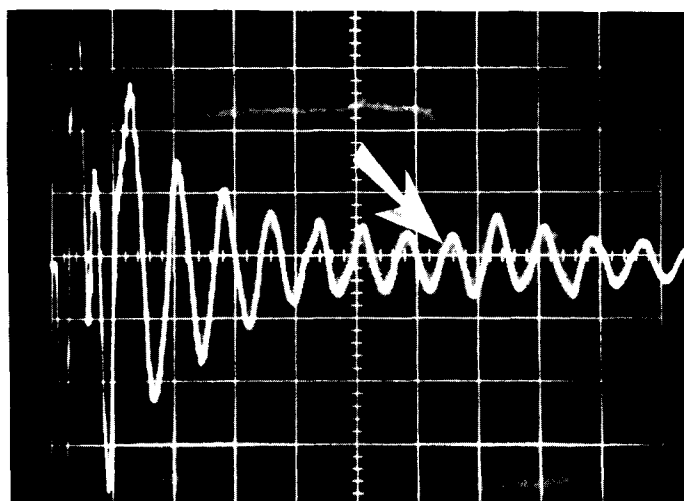
Pieu foré, ferrailé, chemisé.

Vitesse  $V = 3\,980$  m/s (mesurée sur éprouvettes d'un prélèvement).

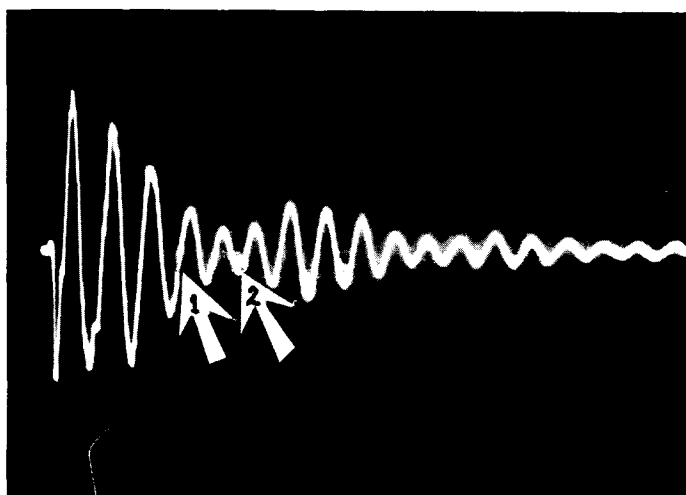
Temps mesuré  $t = 6\,400$   $\mu$ s.

Longueur théorique  $h' = 12,7$  m.

Longueur calculée  $h = 1/2 Vt = 12,7$  m.



**Pieu expérimental**



**Pieu avec défauts volontaires**

Le pieu était foré, ferrailé et chemisé, de 8 m de longueur.

Vitesse  $V = 4\,160$  m/s (mesurée sur éprouvette d'un prélèvement).

Distance du défaut partiel (planche)  $h'_1 = 5$  m

Distance de la discontinuité (béton sous-dosé)  $h'_2 = 7$  m

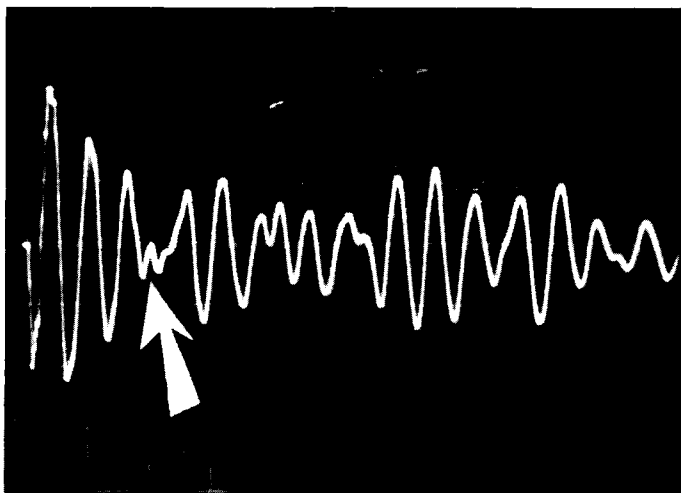
Une planche et une reprise de bétonnage de 12 heures sur béton sous-dosé.

Les mesures :

Temps mesurés :  $t_1 = 2\,300$   $\mu$ s (flèche 1)  
 $t_2 = 3\,200$   $\mu$ s (flèche 2)

L'écart est de — 20 cm pour la discontinuité partielle et de — 30 cm pour la discontinuité totale. La réflexion due au fond du pieu n'a pas été reçue.





**Pieu avec défauts**

Pieu avec fissures

Vitesse  $V = 4\,320$  m/s (mesurée sur le pieu avant battage).

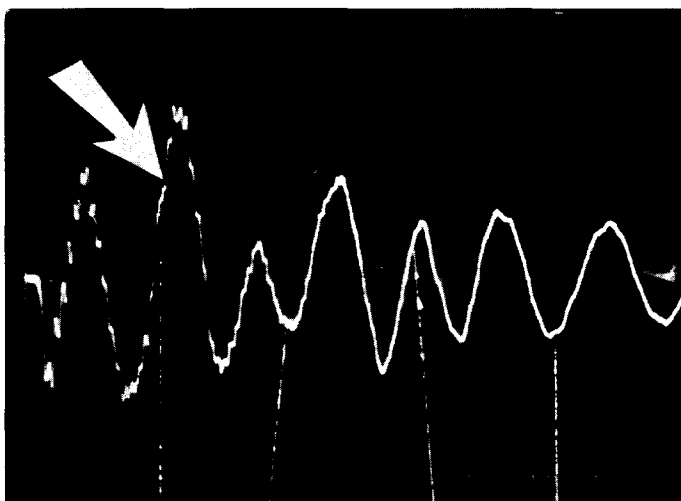
Temps mesuré  $t = 1\,900$   $\mu$ s.

Longueur théorique : 7 m.

Distance de la fissure  $h' = 4,20$  m.

Longueur calculée  $h = 4,10$  m.

Il s'agissait d'une fissure très importante qui ne permettait pas la transmission de l'onde jusqu'au fond du pieu. L'existence de la fissure a été contrôlée visuellement.



Pieu avec délavage du béton

Le pieu est foré, ferrillé et non chemisé.

Vitesse  $V = 3\,630$  m/s (mesurée sur éprouvettes).

Temps mesuré  $t = 1\,050$   $\mu$ s.

Longueur calculée  $h = 2,50$  m.

On a constaté la présence d'un défaut à 2,50 m qui intéresse toute la section du pieu. Le carnet de bétonnage a confirmé à ce niveau un délavage possible du béton du pieu.

Pieu avec diminution de résistance du béton

Le pieu est foré, ferrillé et chemisé.

Vitesse  $V = 4\,340$  m/s (mesurée sur carottage du pieu).

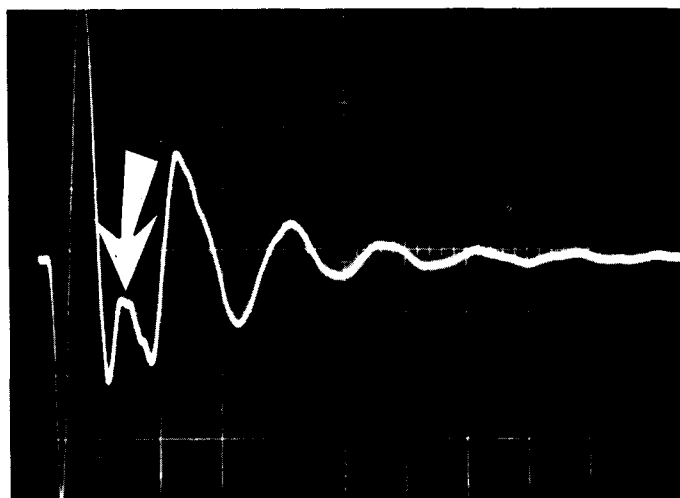
Temps mesuré  $t = 700$   $\mu$ s.

Longueur calculée  $h = 1,50$  m.

Les mesures effectuées sur les carottes prélevées montrent une diminution de la résistance à la compression.

Les résistances à la compression simple étaient :

- maximum à la profondeur de 18 m et égale à 431 bars,
- seulement de 240 bars au niveau du défaut.



## CONCLUSION

L'expérience acquise jusqu'à ce jour a montré que l'auscultation sonique des pieux en béton pouvait mettre en évidence les défauts ci-après :

- une diminution de résistance du béton par délavage, par sous-dosage ou par des vides dus à une mauvaise mise en place ;
- un étranglement du pieu dans le cas de pieux non chemisés ;
- une rupture du pieu.

Toutefois, la méthode reste d'exploitation difficile :

- le paramètre de référence, la vitesse du son du béton ne sont pas toujours bien connus ;
- l'interprétation des oscillogrammes est parfois délicate ;
- la longueur d'investigation avec le matériel actuel reste limitée à 15 mètres.

Pour déterminer la nature des anomalies, il est nécessaire d'établir des corrélations entre les résultats des mesures et les carnets de chantier des surveillants.

Cette méthode d'investigation suppose une grande expérience des techniciens pour la meilleure interprétation des oscillogrammes.

Toutefois, les résultats sont très rapidement connus, parce que le matériel d'essai est très maniable et peut être mis rapidement en place.

Le premier résultat sur un pieu peut être donné dans les quelques minutes suivantes.

C'est là, pour les ingénieurs maîtres d'œuvre, une possibilité très intéressante de mieux connaître la qualité des pieux en béton pour la fondation de leurs constructions.

Rédigé en octobre 1969

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BEYLICH M., *Compte rendu des Journées des Fondations du 6 au 11 mai 1963 - Types de fondations classiques. Contrôle des pieux.* L.C.P.C. (épuisé).
- [2] BRUNETTI M., *L'auscultation du béton par la mesure des vitesses de propagation d'ondes élastiques impulsives.* Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Ch. 11, (1965), 5.1 - 5.12.
- [3] PAQUET J., *Etude vibratoire des pieux en béton. Réponse harmonique et impulsionnelle. Application au contrôle.* Annales I.T.B.T.P. 245, (1968).
- [4] GOLIS M.J., *Pavement thickness measurement using ultrasonic pulses,* Highway Research Record 218, (1968).
- [5] MC GONNAGLE, W.J., *Essais non destructifs. Métaux et matériaux divers - Traduction de JOSEPH M.C., Editions Eyrolles, (1967).*
- [6] JONES R., *Essais non destructifs des bétons - Traduction de ELIE A.R., Editions Eyrolles, (1967).*