

Détermination en laboratoire du délai de maniabilité des graves-ciment

Méthode d'auscultation dynamique

Jean-Louis PAUTE*
Ingénieur ENSM
Directeur-adjoint

Olivier HAMEURY
Ingénieur des Travaux publics de l'État
Docteur ECP
Chef de l'unité Formulation et modélisation des matériaux de chaussées
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc

Gérard LABOIS
Ingénieur
Chef de projets
Centre d'études et de construction de prototypes de Rouen

RÉSUMÉ

Les graves-ciment sont des matériaux d'assises de chaussées à prise rapide nécessitant, soit l'incorporation d'un retardateur de prise lors du malaxage du matériau, soit l'utilisation de liants hydrauliques spéciaux présentant une cinétique de prise plus lente que dans le cas des ciments normalisés. L'article décrit une méthode de laboratoire permettant de déterminer le délai de maniabilité d'une grave-ciment en suivant, par auscultation dynamique, l'évolution de la rigidité d'une éprouvette compactée immédiatement après la fabrication du mélange. La méthode d'exploitation de l'essai repose sur des comparaisons avec des essais de résistance mécanique et des essais de compactage.

MOTS CLÉS : 33 - Granulat - Granulométrie continue - Essai - Laboratoire - Compactage - Résistance (matér.) - Éprouvette - Ciment - Traitement des assises - Méthode - Auscultation - Maniabilité - Mécanique - Dynamique.

Introduction

Au début des années 1970, rares étaient les régions en France où la technique des graves-ciment était encore utilisée pour réaliser les assises de chaussées. La réalisation du plan routier breton [1], où cette technique a été largement utilisée, a été l'occasion de développer un vaste programme de recherches pour l'améliorer et supprimer ses inconvénients. Le principal était que les graves-ciment présentaient le défaut de manquer de maniabilité lors de la mise en œuvre, du fait du développement rapide de la prise du ciment.

Ce défaut de maniabilité se traduisait par des difficultés de compactage et, à terme, par l'obtention de performances mécaniques bien plus faibles que celles obtenues en laboratoire sur des éprouvettes compactées immédiatement après la confection des mélanges.

Les recherches entreprises à cette époque dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC), mais aussi avec le concours de l'industrie cimentière et du Centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques (CERILH), ont conduit à proposer de nouvelles dispositions techniques pour conférer aux graves-ciment la souplesse d'emploi nécessaire à l'obtention du niveau de qualité pris en compte dans les études de dimensionnement des chaussées [3, 4].

Les **deux innovations principales** ont été :

➤ l'introduction des retardateurs de prise lors du malaxage du mélange « grave + ciment + eau »,

* Actuellement à la retraite.

➤ l'utilisation de liants à usage routier à mouture plus grossière que les ciments normalisés et contenant en outre de forte proportion d'ajouts actifs (laitier) ou inactifs (calcaire).

Le problème s'est alors posé de caractériser le délai de maniabilité offert par ces nouvelles formulations.

Deux types d'essais ont été envisagés :

- le compactage différé des mélanges suivant le mode opératoire de l'essai Proctor-Modifié,
- l'auscultation dynamique d'éprouvettes confectionnées juste après la confection du mélange.

■ Le **compactage différé** présentait l'avantage de la simplicité. Cependant, ses inconvénients majeurs résidaient, d'une part, dans son côté fastidieux puisqu'il fallait compacter différents échantillons d'un même mélange en apportant des retards croissants compris entre une heure et vingt-quatre heures. D'autre part, il présente une précision toute relative puisque le délai de maniabilité est réputé atteint lorsque la masse volumique apparente sèche est réduite de 2 % par rapport à la masse volumique obtenue sans différer le compactage. On sait que la précision de l'essai sur la détermination de la masse volumique apparente n'est guère meilleure que 1 %.

■ L'**auscultation dynamique** en continu d'une éprouvette fixée sur un banc d'essai paraissait un procédé bien plus simple, même s'il nécessite un appareillage spécifique. Les premières tentatives paraissent encourageantes [2], un appareillage spécifique a été réalisé en 1978 par le Centre d'études et de construction de prototypes (CECP) de Rouen. Une étude destinée à mettre au point une méthode d'essai a alors été réalisée par les Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC) de Rouen et de Saint-Brieuc. Bien que traduits dans les spécifications de la directive Graves hydrauliques [5], les résultats de cette étude n'ont jamais été publiés. Il nous a paru utile de le faire en liaison avec la publication des normes d'essai NF P 98-231-5 [6] et NF P 98-231-6 [7] et avec la diffusion d'une version récente de l'appareil d'auscultation dynamique destiné à la détermination du délai de maniabilité des graves-ciment : le BAUME (banc d'auscultation et de mesures) [8, 9].

Principe de l'essai

Le principe de l'essai est relativement simple. Il consiste à caractériser la rigidification progressive de la grave-ciment due à la prise du ciment en mesurant en continu la durée de propagation de l'onde dans une éprouvette compactée immédiatement après la confection du mélange. Cependant, cette seule mesure n'est pas suffisante. Elle ne permet pas à elle seule de définir le seuil de perte de maniabilité se traduisant par une difficulté de compactage et un affaiblissement des performances de la grave-ciment.

L'idée principale a donc été de corréler l'évolution de la durée de propagation de l'onde dans l'éprouvette avec la diminution de la masse volumique apparente sèche Proctor-Modifié, et la réduction des performances mécaniques, lorsque l'on diffère le compactage.

Les critères retenus pour définir le délai de maniabilité ont été les suivants [4] :

« Le délai de maniabilité déterminé par auscultation dynamique d'une éprouvette en cours de prise correspond au temps pendant lequel il serait possible de compacter la grave-ciment sans que sa masse volumique apparente ne diminue de plus de 2 % ou que son indice de qualité élastique n'augmente de plus de 10 % par rapport à un matériau fraîchement produit ».

On définit alors un coefficient de calage C unique pour lequel le délai de maniabilité D_m est atteint lorsque le temps de propagation de l'onde $D_p(D_m)$ est tel que :

$$D_p(D_m) = C \times D_{p0} \quad (1)$$

avec D_{p0} = durée de propagation de l'onde initiale (âge = 0) extrapolée à partir de la courbe $D_p = f(\text{âge})$.

Le banc d'auscultation dynamique LPC – Description et évolution

L'appareil d'auscultation dynamique initial de 1978 avait été conçu en utilisant les composants disponibles de l'époque. Les progrès de l'informatique et de l'électronique de mesure ont permis d'envisager une nouvelle version d'appareil beaucoup plus performante et conviviale que la précédente. La version actuelle ou BAUME (1995) est, quant au principe de mesure, tout à fait conforme au prototype qui a servi pour mettre au point la procédure d'essai en 1978.

Pour les deux versions d'appareils, les éprouvettes de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur destinées à l'essai sont compactées par vibrocompression. Elles sont conservées dans l'étui en PVC et protégées par deux couvercles percés en leur centre d'un trou correspondant au diamètre des sondes (émetteur et récepteur) afin de conserver l'humidité de la grave-ciment pendant toute la durée de l'essai.

Le banc d'auscultation de 1978

Ce banc comprenait **deux éléments principaux** (fig. 1a) :

- ❶ **un bâti**, équipé d'émetteurs et de récepteurs ultrasoniques appliqués par un vérin pneumatique aux extrémités de l'éprouvette. Il était conçu pour ausculter en même temps trois éprouvettes de 16 cm de diamètre et d'élanement 2 ;
- ❷ **une baie électronique** contenant la chaîne électronique de mesure et de contrôle ainsi que les commandes pneumatiques des vérins.

- Le **bâti** pouvait être introduit dans une enceinte thermo-régulée permettant de réaliser les essais à des températures différentes de la température ambiante.
- La **chaîne électronique** était constituée de quatre éléments :

- un *auscultateur-scrutateur* pour alimenter et transmettre les informations simultanées des trois couples de sondes. La fréquence de scrutation des voies était réglée sur l'enregistreur décrit ci-après ;
- un *oscilloscope* de 15 MHz pour visualiser et analyser les signaux ;
- une *minuterie* pour alterner la commande des sessions de mesure de la propagation des ondes et la commande de la régulation en température afin d'éviter le bruit de fond engendré par le fonctionnement de l'enceinte thermo-régulée ;
- un *enregistreur graphique* à six voies pour tracer les courbes d'évolution de la durée de propagation de l'onde en fonction du temps. Le réglage de l'intervalle d'impression déterminait la fréquence de scrutation. Deux gammes de mesure étaient possibles, 0 à 500 μ s et 0 à 100 μ s.

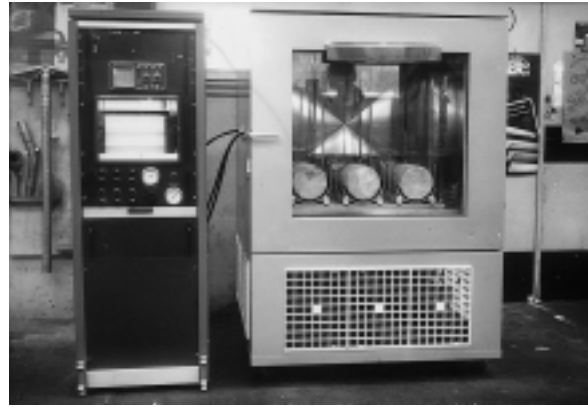
L'étude préliminaire avait montré que la pression de contact sur la grave-ciment, non durcie au début de l'essai, devait être voisine de 1 MPa pour qu'il y ait une transmission correcte de l'onde dans le matériau.

Le « BAUME » de 1995

Il est maintenant constitué de **deux sous-ensembles distincts** (fig. 1b) :

- ① le **banc de mesure**, équipé d'émetteurs et de récepteurs ultrasoniques, d'un système de mise en pression pour assurer une bonne transmission de l'onde ;
- ② l'**unité d'acquisition**, composée essentiellement d'une carte d'acquisition de données analogique rapide (1 MHz) et de traitement, intégrée à un micro-ordinateur de type PC dans un slot ISA avec une résolution de 12 bits. Une imprimante est associée au micro-ordinateur.

- Le **banc de mesure** a pour fonction de recevoir, selon la version, une, deux ou trois éprouvettes. Il est constitué d'un bâti et de chariots supports d'éprouvettes.
 - Les *chariots supports d'éprouvettes* sont conçus pour recevoir, comme pour la version précédente, des éprouvettes de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Un dispositif de réglage des bâtis permet de les ajuster pour recevoir également des éprouvettes de 10 et 20 cm de hauteur (une telle disposition permettra de mettre au point une variante de l'essai adaptée aux sables-ciment). Ils sont équipés des récepteurs de mesure qui coulisent dans le bâti et s'y bloquent par des doigts d'indexage (éprouvettes de 20 ou 32 cm de longueur). Les éprouvettes, comme dans le modèle de 1978, sont contenues dans leur étui et protégées aux extrémités par des couvercles en matière plastique, percés au diamètre des capteurs.
 - Le *bâti* permet d'accueillir et de mettre en position l'éprouvette. Un dispositif comprenant un vérin pneu-



a. Banc d'auscultation de 1978.



b. BAUME de 1995.

Fig. 1 - Vue générale de l'appareil d'essai.

matique assure la mise en pression des capteurs sur les extrémités de l'éprouvette. La pression de contact entre les capteurs et le matériau doit être maintenue à 1 MPa pendant l'essai.

Pour régler et maintenir cette pression, le bâti est équipé d'un circuit de mise en charge des vérins comprenant :

- une réserve d'air alimentée au travers d'un bloc détendeur filtre et huileur et protégée à l'entrée par un clapet anti-retour. Un robinet permet de purger cette réserve ;
- un panneau de commande rassemblant les boutons de mise en pression de chacun des vérins ;
- un capteur de pression d'air permettant au système d'exploitation du banc de signaler et de gérer un manque de pression avant ou pendant l'essai.

- La **carte d'acquisition de données** peut accepter huit entrées différentielles (trois sont utilisées actuellement). La différence de gain utilisable entre le début et la fin de l'essai est 86 dB. Cette carte permet de réaliser la commande électronique, l'acquisition et le traitement (moyennage) du signal.

La carte de commande électronique est intégrée au bâti de mesure. Elle permet la sélection des voies de mesure (une à trois voies) et supporte les amplificateurs, les filtres pour adapter les signaux ultrasoniques et le capteur de pression.

L'arrière du boîtier est équipé de trois prises :

- une pour l'alimentation secteur (la mise sous tension est assurée par le micro-ordinateur) ;
- une pour la commande d'arrêt de l'enclencheur régulé en température. Celle-ci doit être arrêtée pour éviter de perturber les mesures (bruit ou secteur) ;
- la dernière permet de raccorder la sortie des récepteurs avec l'entrée de la carte d'acquisition.

Les émetteurs ultrasoniques sont des pastilles piézo-électriques excitées avec une tension de plusieurs centaines de volts. Ces pastilles sont fixées sur le bâti porte-éprouvettes dans des boîtiers isolés.

Les récepteurs ultrasoniques sont également situés dans des boîtiers isolés du bâti ; une prise permet de débrancher le récepteur pour pouvoir sortir le bâti (fig. 2).

Détermination de la durée de propagation de l'onde suivant l'axe de l'éprouvette

Banc d'auscultation de 1978

La durée de propagation de l'onde est mesurée par l'horloge intégrée au système à l'aide d'un seuil d'intensité du signal (fig. 3a). Lorsque l'on ausculte une grave-ciment durcie, si le signal reçu à l'extrémité opposée de l'éprouvette est du même ordre de grandeur que le signal émis (A), la mesure ne présente pas de difficulté. Par contre, aux jeunes âges, lorsque la prise du ciment ne s'est pas encore produite, l'intensité de la première demi-alternance négative est très réduite et inférieure au seuil de déclenchement de l'horloge (B). Dans ce cas, le réglage sur la première alternance négative introduirait une erreur importante, Δt , sur la durée de propagation (B-1). On a donc jugé plus juste d'éviter cette erreur (aléatoire) en réglant l'appareil sur l'alternance positive suivante (B-2). On mesure ainsi une durée de propagation de l'onde dans l'éprouvette par défaut, D_p . L'écart par rapport à la valeur vraie étant constant :

$$D_p = D_0 + D_{p1} + D'_0$$

avec

D_0 , la durée de propagation de l'onde dans les sondes, négligée car très faible par rapport aux autres valeurs ;
 D_{p1} , la durée de propagation « vraie » dans l'éprouvette ;

D'_0 , la durée de propagation correspondant à la première demi-période du signal.

« BAUME » de 1995

Grâce à son système d'acquisition de données incorporé, ce nouvel appareil permet de mesurer à intervalles réguliers (5 minutes) dix signaux consécutifs, d'en déduire le signal moyen et de l'enregistrer. Le programme permet de déterminer l'intensité de la première amplitude et de calculer le temps de propagation de l'onde correspondant à 50 % de cette valeur (fig. 3b).

Le temps de propagation correspondant au signal enregistré est alors déterminé comme suit :

$$D_p = D_0 + D_{p1} + D'_0$$

D'_0 est ici bien inférieur à la valeur obtenue avec l'appareil de 1978.

Plan de l'expérimentation

Le plan de l'expérimentation qui a permis de mettre au point la méthode d'essai comprenait la série d'essais suivants sur les formules de graves-ciment définies dans le tableau I :

- auscultation dynamique d'éprouvettes compactées immédiatement après la confection des mélanges,
- essais de compactage différés à l'énergie Proctor-Modifié (norme NF P 98-231-1) sur les mélanges conservés en sacs étanches,
- essais de traction directe à 90 ou 120 jours sur éprouvettes confectionnées en différant le compactage suivant des délais croissants.

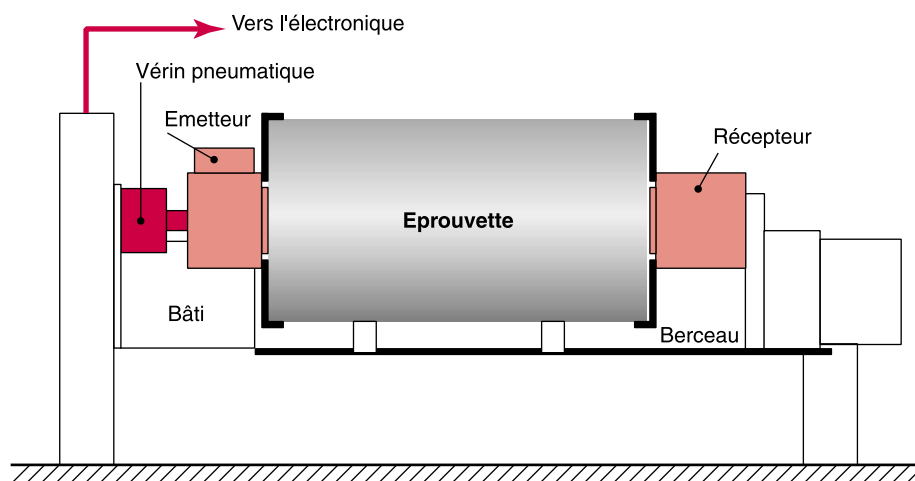
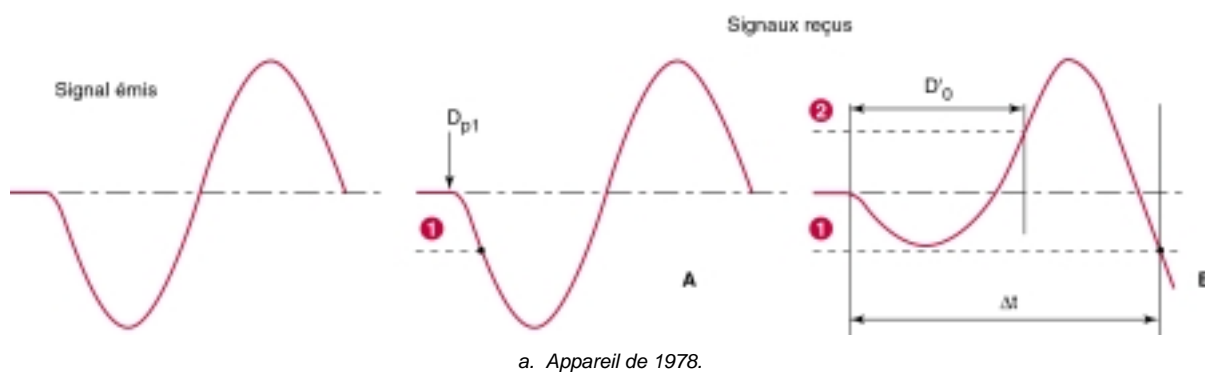
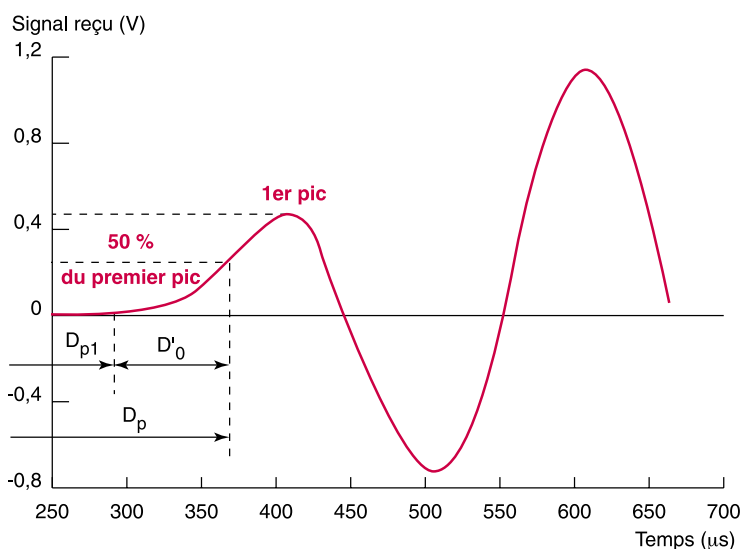


Fig. 2 - Schéma de fonctionnement du BAUME.

Fig. 3 - Détermination du temps de propagation de l'onde.



a. Appareil de 1978.



b. BAUME de 1995 (avec inversion de polarité du signal reçu).

TABLEAU I
Liste des formules de graves-ciment de l'étude

| Formule | Grave | | | Dosage en liant | | | Teneur en eau (%) | Dosage en retardateur de prise (%) |
|---------|--------|-----------------|------|-----------------|-----|-----|-------------------|------------------------------------|
| | Persas | Bois de Conveau | Brix | CPAL 450 | FPL | CVG | | |
| 1B | 100 | | | 3,5 | | | 6 | 0 |
| 2B | 100 | | | 3,5 | | | 6 | 1 |
| 3B | 100 | | | | 3,5 | | 6 | 0 |
| 4B | 100 | | | | 3,5 | | 6 | 1 |
| 5B | 100 | | | | | 4 | 6 | 0 |
| 6B | | 100 | | 3,5 | | | 6,5 | 0 |
| 2RB | | | 100 | 3,5 | | | 5,7 | 1 |
| 2RR | | | 100 | 3,5 | | | 5,7 | 1 |

Matériaux de l'étude

Les graves

Les trois graves sont issues du concassage de roches massives. Persas est une leptynite, Bois de Conveau un grès armoricain et Brix un quartzite (fig. 4). Leurs principales caractéristiques sont données dans le tableau II.

Les liants

Les liants CPAL et FPL avaient les caractéristiques figurant dans le tableau III.

Les caractéristiques des cendres volantes de Gardanne étaient les suivantes :

- masse volumique : 2,9 g/cm³,
- surface spécifique Blaine : 2 610 cm²/g,

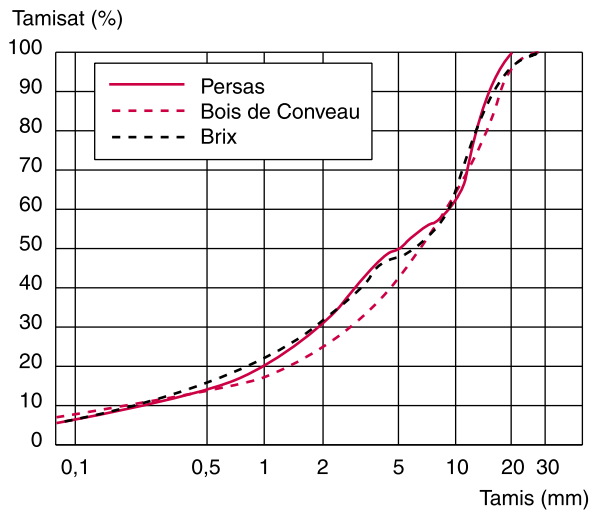


Fig. 4 - Courbes granulométriques des graves de l'étude.

TABLEAU II
Caractéristiques des granulats

| Grave | Los Angeles (LA) P 18-573 | Micro Deval (MDE) P 18-572 | Propreté des sables (PS) P 18-597 |
|-----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Persas | 17 | 15 | 54 |
| Bois de Conveau | 22 | 15 | 58 |
| Brix | 16,5 | / | / |

TABLEAU III
Caractéristiques des liants

| Liant | Masse volumique (kg/m ³) | Surface spécifique Blaine (cm ² /g) | Essais sur mortier ISO | | |
|-------|--------------------------------------|--|------------------------|--------------|------------------------|
| | | | Début de prise | Fin de prise | R _{c28} (MPa) |
| CPAL | 3,12 | 2 775 | 3 h 10 | 7 h 15 | 49 |
| FPL | 2,99 | 2 056 | 5 h 30 | > 24 h | 17 |

- passant à 80 µm : 88 % – CaO libre : 21 %,
- insolubles dans HCl dilué au 1/50^e : 21 %,
- résistance à la compression sur sable traité : 0,8 MPa à 7 jours et 4,7 MPa à 90 jours.

Le retardateur de prise

Le retardateur de prise utilisé était un adjuvant non normalisé connu en 1978 sous l'appellation « Plastiroute », produit par la société Sika et contenant des polysaccharides modifiés.

Caractéristiques de compactage des graves-ciment

Les résultats de l'essai Proctor-Modifié sur les trois graves traitées avec 3,5 % de ciment sont indiqués dans le tableau IV. Les éprouvettes pour les essais d'auscultation dynamique et pour les essais mécaniques ont été confectionnées à w_{OPM} et $\rho_{d OPM}$.

TABLEAU IV
Caractéristiques de compactage des graves-ciment

| Grave | w_{OPM} (%) | $\rho_{d OPM}$ (kg/m ³) |
|-----------------|---------------|-------------------------------------|
| Persas | 6,0 | 2 340 |
| Bois de Conveau | 6,5 | 2 260 |
| Brix | 5,7 | 2 265 |

Essais réalisés

Pour chaque formule de grave-ciment, trois séries d'essais ont été réalisées.

Compactage Proctor-Modifié différé

Quatre à six essais de compactage dans le moule CBR suivant l'énergie Proctor-Modifié ont été réalisés en différant le compactage suivant des délais compris entre 0 et 48 heures en fonction du type de liant et de la présence ou non de retardateur de prise dans la formule. Cet essai renseigne sur la difficulté de compactage, à énergie constante, provenant du délai apporté à cette opération. Pour chaque modalité, il n'a été réalisé qu'un seul essai.

Essais de traction directe sur éprouvettes dont le compactage est différé

En fonction des résultats des essais précédents, des éprouvettes sont compactées par vibrocompression aux masses volumiques correspondant au délai considéré. Ces essais renseignent sur la perte de résistance provenant du délai apporté au compactage. Pour chaque modalité, il n'a été réalisé qu'un seul essai.

Essais d'auscultation dynamique

Pour chaque formule, on a procédé à l'auscultation dynamique, dans les conditions décrites ci-dessus, sur des éprouvettes compactées immédiatement après la confection du mélange. Plusieurs répétitions ont eu lieu pour chaque formule.

Résultats des essais de calage réalisés avec le banc de 1978

Comparaison entre les trois types d'essais

Les essais réalisés sur les différentes formules de graves-ciment montrent que l'incidence du délai apporté au compactage sur les propriétés du matériau dépend largement de la nature du liant hydraulique utilisé et de la présence ou non de retardateur dans la formule.

La figure 5 montre que la réduction de la masse volumique apparente est très rapide dans le cas d'une grave traitée au CPAL (formule 1B), mais elle peut être plus lente si l'on ajoute un retardateur de prise (formule 2B) et très lente, dans le cas d'une autre grave traitée aux cendres volantes de Gardanne (formule 5B).

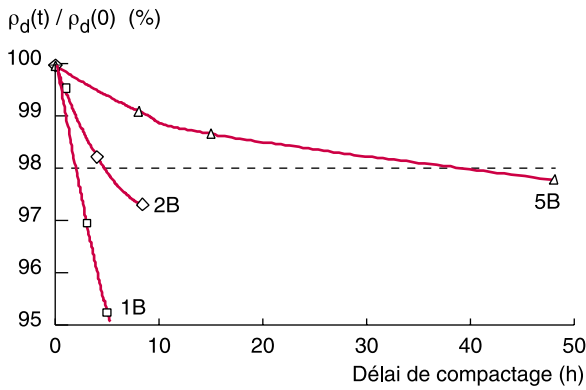


Fig. 5 - Incidence du délai de compactage sur la réduction de la masse volumique apparente à l'énergie Proctor-Modifié.
 1B : Gravier traité au CPAL.
 2B : Avec ajout d'un retardateur de prise.
 3B : Gravier-cendres volantes.

Le délai apporté au compactage se traduit aussi par l'affaiblissement des performances mécaniques, les liaisons provenant de la cristallisation des hydrates du ciment étant partiellement détruites. Cette évolution est suivie sur la figure 6 par l'indice de qualité élastique (IQE), défini comme une épaisseur équivalente de chaussée [5] : pour une structure bicouche constituée en partie supérieure du matériau étudié, l'IQE est l'épaisseur conduisant, pour des conditions de charge définies (jumelage standard français), à une contrainte en fond de couche égale à la résistance en traction de la grave-ciment (nota : le matériau est ainsi d'autant plus performant que son IQE est faible).

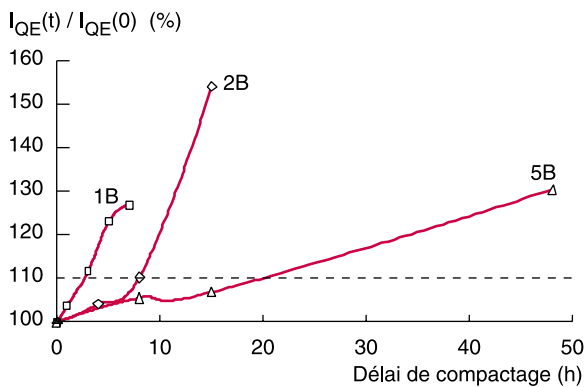


Fig. 6 - Incidence du délai de compactage sur la réduction des performances mécaniques des graves-ciment.

La figure 7 donne quelques exemples d'enregistrement de la durée de propagation de l'onde, D_p , en fonction du temps. On note une rapide évolution de D_p au fur et à mesure que se développe la prise du liant et que se rigidifie le matériau. On distingue aisément le type de liant et la présence éventuelle d'un retardateur de prise.

Devant la similitude de l'évolution des paramètres pris en compte, des corrélations ont été recherchées. Le critère pris comme référence a été celui de l'affaiblissement des performances mécaniques. La résistance en traction directe, R_t , et le module, E , conduisent à l'indice qualité élastique, I_{QE} .

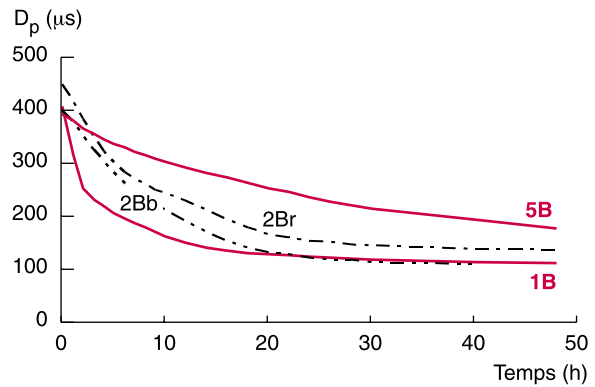


Fig. 7 - Auscultation dynamique des éprouvettes de grave-ciment sans différer leur compactage. Évolution du temps de propagation D_p en fonction de l'âge de l'éprouvette.

Le principe retenu pour l'établissement de ces corrélations est indiqué sur la figure 8. Pour chaque grave-ciment, on se fixe un taux d'augmentation de l' I_{QE} (7,5-10 et 15 % par rapport à la valeur initiale), soit $I_{QE}(ref)$, puis, en se reportant aux graphiques correspondants, on en déduit $\rho_d(t)$ et le rapport $\rho_d(t)/\rho_d(0)$, $D_p(t)$ et le rapport $D_p(t)/D_p(0)$. Le tableau V donne les correspondances observées.

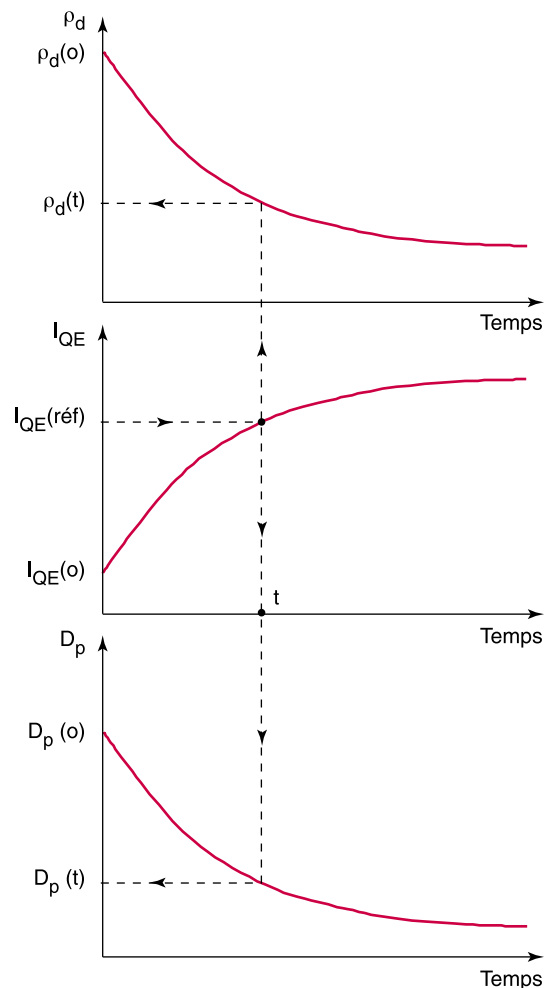


Fig. 8 - Schéma de principe de l'établissement des corrélations entre les différents essais.

TABLEAU V
Corrélation entre les différents essais

| Formule | $I_{QE(ref)}/I_{QE(0)} = 1,075$ | | $I_{QE(ref)}/I_{QE(0)} = 1,10$ | | $I_{QE(ref)}/I_{QE(0)} = 1,15$ | |
|-------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
| | $D_p(t)/D_p(0)$ | $\rho_d(t)/\rho_d(0)$ | $D_p(t)/D_p(0)$ | $\rho_d(t)/\rho_d(0)$ | $D_p(t)/D_p(0)$ | $\rho_d(t)/\rho_d(0)$ |
| 1B | 0,66 | 0,98 | 0,60 | 0,98 | 0,55 | 0,97 |
| 2Bb | 0,64 | 0,98 | 0,59 | 0,97 | 0,55 | 0,96 |
| 2Br | 0,63 | 0,98 | 0,59 | 0,98 | 0,55 | 0,97 |
| 3B | 0,70 | 0,99 | 0,60 | 0,97 | 0,47 | 0,95 |
| 4B | 0,68 | 0,98 | 0,60 | 0,98 | 0,52 | 0,97 |
| 5B | 0,70 | 0,99 | 0,66 | 0,99 | 0,59 | 0,98 |
| 6B | 0,73 | 0,99 | 0,65 | 0,99 | 0,52 | 0,99 |
| 2RB | 0,77 | 0,99 | 0,70 | 0,99 | 0,58 | 0,98 |
| 2RR | 0,81 | 0,99 | 0,75 | 0,99 | 0,66 | 0,98 |
| moyenne (*) | 0,68 | 0,98 | 0,61 | 0,98 | 0,54 | 0,97 |
| (**) | 0,70 | 0,99 | 0,64 | 0,98 | 0,55 | 0,97 |

(*) : formules 1B à 6B. (**): toutes les formules.

Les formules 2B et 2R ont fait l'objet de répétitions dans deux laboratoires (respectivement 2Bb-2Br et 2Rb-2Rr).

C'est le cas central $I_{QE(ref)}/I_{QE(0)} = 1,10$ qui a été retenu pour la méthode d'essai.

Ainsi, on peut dire que le délai de maniabilité d'une grave-ciment, D_m , est le temps compté à partir du malaxage de la grave et qui est déterminé par la durée de propagation de l'onde D_p égale à 60 % de la durée de propagation initiale, $D_p(0)$. Au délai de maniabilité D_m correspond une réduction de masse volumique apparente de 2 % et une augmentation de I_{QE} de 10 %.

Répétabilité de l'essai

Bien que l'on n'ait pas procédé à des essais interlaboratoires, puisque à l'origine seulement deux d'entre eux étaient équipés, les formules mentionnées dans le tableau V ont été l'objet de plusieurs répétitions (deux à cinq). Il est donc possible d'apprécier la précision de la méthode en exploitant maintenant chacun des essais comme il est indiqué ci-dessus. La répétabilité de l'essai peut être appréciée en comparant les essais d'un même laboratoire et l'on peut avoir une idée de sa reproductibilité en comparant les résultats des deux laboratoires sur les mêmes formules. Le tableau VI donne les valeurs obtenues.

L'écart de répétition sur la valeur du délai de maniabilité est en moyenne de $\pm 7\%$ et peut être au maximum de $\pm 13\%$, ce qui est relativement modeste au regard de ce que l'on observe, en général, pour les essais routiers. On peut penser que la nouvelle génération d'appareil d'auscultation dynamique, entièrement automatique, avec traitement du signal numérisé conduirait à des résultats encore meilleurs.

TABLEAU VI
Délais de maniabilité obtenus avec la formule $D_p(D_m) = 0,6 D_p(0)$

| Formule | Éprouvette n° | D_m (h) | D_m moyen (h) | Amplitude des écarts relatifs (%) | Écart entre laboratoires (%) |
|---------|---------------|-----------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 1B | 1 | 2 h 00 | | | |
| | 2 | 2 h 30 | 2 h 20 | 18 | / |
| | 3 | 2 h 30 | | | |
| 2Bb | 1 | 8 h 00 | | | |
| | 2 | 7 h 30 | | | |
| | 3 | 7 h 30 | 7 h 40 | 6 | |
| | 4 | 7 h 30 | | | |
| | 5 | 7 h 30 | | | 9 |
| 2Br | 1 | 6 h 30 | | | |
| | 2 | 8 h 30 | 7 h 20 | 27 | |
| 3B | 3 | 7 h 00 | | | |
| | 1 | 3 h 45 | 3 h 20 | 22 | / |
| 4B | 2 | 3 h 00 | | | |
| | 1 | 10 h 00 | | | |
| | 2 | 12 h 30 | 10 h 50 | 23 | / |
| 5B | 3 | 10 h 00 | | | |
| | 1 | 24 h 00 | | | |
| 6B | 2 | 22 h 00 | 23 h 00 | 8 | / |
| | 3 | 23 h 00 | | | |
| 2R | 1 | 3 h 30 | 3 h 30 | 0 | / |
| | 2 | 3 h 30 | | | |
| 2Rb | 1 | 22 h 30 | 23 h 30 | 6 | |
| | 2 | 24 h 00 | | | 20 |
| 2Rr | 1 | 32 h 00 | 29 h 25 | 19 | |
| | 2 | 26 h 30 | | | |

Essais de calage du « BAUME » de 1995

Le programme d'essais entrepris avait deux objectifs principaux :

- ❶ vérifier sur le même matériau que les mesures du temps de propagation de l'onde et que les valeurs de délai de maniabilité obtenues avec le nouveau banc d'auscultation dynamique étaient comparables à celles obtenues avec l'appareil de 1978 ;
- ❷ reproduire sur un nombre limité de matériaux les correspondances entre la diminution de la masse volumique apparente, la diminution de résistance et l'évolution du temps de propagation de l'onde.

Matériaux de l'étude

Les graves sont en majorité d'origine éruptives, donc riches en silice, sauf une qui est un calcaire dur de l'ère primaire. Leur granulométrie est très voisine de celles de la figure 4. Les liants sont en majorité des CPJ 45 mais la liste comporte aussi des liants à usage routier (tableau VII).

Comparaisons entre les deux générations d'appareils

Les mesures ont été faites sur la grave Kervrahu traitée à 3,5 % de CPJ 45 et contenant 1 % de Plastiroute.

La figure 9 montre qu'aux jeunes âges on n'obtient pas tout à fait les mêmes valeurs du temps de propagation de l'onde avec les deux générations d'appareils. Cela n'est pas surprenant puisque, comme cela a été indiqué au paragraphe « Détermination de la durée de propagation de l'onde suivant l'axe de l'éprouvette », l'erreur systématique D'_0 est beaucoup plus importante avec l'appareil de 1978 et qu'elle s'amenuise avec le durcissement de l'éprouvette. En d'autres termes, l'erreur D'_0 est minimisée avec le BAUME et la mesure du temps de propagation de l'onde est plus juste.

Les essais de calage du BAUME sur l'appareil de 1978 ont consisté à réaliser, à l'aide des deux appareils des

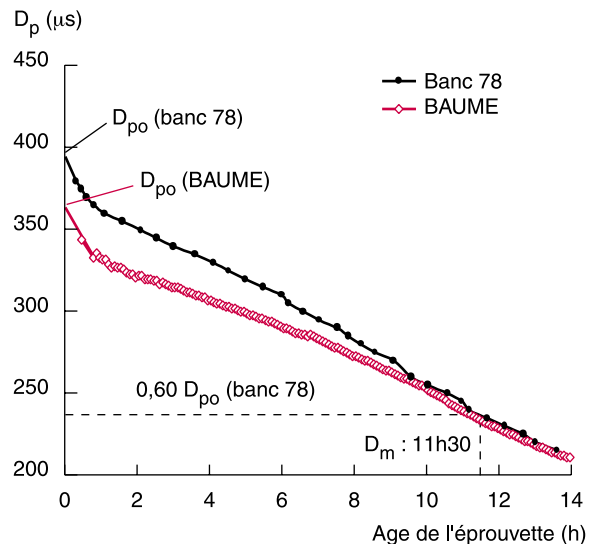


Fig. 9 - Évolution du temps de propagation de l'onde en fonction de l'âge de l'éprouvette avec les deux types d'appareils.

mesures du temps de propagation de l'onde en continu sur les mêmes formules de grave-ciment et dans les mêmes conditions de température. Le délai de maniabilité, D_m , de chaque matériau a été déterminé avec l'appareil de 1978. Sur la courbe d'évolution du temps de propagation de l'onde obtenue avec le BAUME, on a relevé les valeurs D_{p0} et $D_p(D_m)$. Le coefficient de calage du BAUME, C de la relation (1) est le rapport :

$$C = \frac{D_p(D_m)}{D_{p0}}$$

Le tableau VIII donne les valeurs obtenues de D_{p0} , D_m et C .

La figure 10 montre que le coefficient de calage C est réparti suivant une loi de Gauss. La dispersion peut paraître relativement importante, mais il faut noter que l'on cumule les erreurs de chacun des deux appareils et que la détermination par l'appareil de 1978 est plus dispersée que celle obtenue avec le BAUME.

TABLEAU VII
Matériaux de l'étude de calage du BAUME

| Grave | LA | MDE | PS | Liant | Début de prise | Fin de prise |
|---------------------------------|------|------|----|----------------------------|----------------|--------------|
| La Montagne Noire (calcaire) | | | | Rolac 124 (avis technique) | > 10 h | |
| Coudray (siliceux) | | | | PRV A Vicat | | |
| Gouviard (siliceux) | 20 | 13,8 | 54 | CPJ CEMIII/A 42,5 (L) CP2 | 2 h 10 | 5 h 45 |
| Kervrahu (siliceux) | | | 51 | | | |
| La Motte | 23,2 | 13,6 | | CPJ 45 | 2 h 26 | 4 h 24 |
| La Lande | 21 | 9,6 | | | | |
| La Croix Gibat (siliceux) | | | | CPJ 45 | 2 h 26 | 4 h 24 |
| Rouperroux (siliceux) | | | | Ligex | | |
| Ségrie (siliceux) | | | | CPJ 45 | | |
| Saint-Denis d'Orques (siliceux) | | | | CPJ 45 | | |

TABLEAU VIII

| Graves | Liants | Retardateur (%) | D _{p0} μs | D _m (heures) | Coefficient C |
|---------------------------|-------------|-----------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| Kervrahu | CPJ 45 | 1,0 | 374 | 10 | 0,58 |
| Kervrahu | CPJ 45 | 0,0 | 368 | 10 | 0,58 |
| Saint-Denis d'Orques (F2) | CPJ 45 | 0,0 | 343 | 3 | 0,58 |
| Saint-Denis d'Orques | CPJ 45 | 0,3 | 333 | 6 | 0,59 |
| Gouviard | CPJ 45 | 2,5 | 346 | 13 | 0,60 |
| Gouviard | CPJ 45 | 2,5 | 346 | 13 | 0,61 |
| Kervrahu | CPJ 45 | 0,0 | 344 | 10 | 0,61 |
| Rouperroux | Ligex | 0,0 | 411 | 14 | 0,61 |
| La Croix Gibat | CPJ 45 | 0,5 | 333 | 5,5 | 0,62 |
| Gouviard | CPJ 45 | 0,5 | 376 | 1,7 | 0,62 |
| Gouviard | CPJ 45 | 1,0 | 355 | 4 | 0,62 |
| Segrie | CPJ 45 | 0,3 | 416 | 6,5 | 0,63 |
| Coudray - Cercanceaux | PRV A Vicat | 0,0 | 338 | 10 | 0,63 |
| Kervrahu | CPJ 45 | 0,0 | 364 | 10 | 0,63 |
| Saint-Denis d'Orques (F2) | CPJ 45 | 0,5 | 311 | 3 | 0,63 |
| Gouviard | CPJ 45 | 1,0 | 338 | 5 | 0,64 |
| Gouviard | CPJ 45 | 1,0 | 370 | 5 | 0,64 |
| La Montagne Noire | Rolac 124 | 0,0 | 324 | 20 | 0,65 |
| Gouviard | CPJ 45 | 2,5 | 339 | 17 | 0,65 |
| Gouviard | CPJ 45 | 2,5 | 371 | 17 | 0,65 |
| Kervrahu | CPJ 45 | 1,0 | 364 | 10 | 0,65 |
| Kervrahu | CPJ 45 | 1,0 | 371 | 10 | 0,65 |
| Gouviard | CPJ 45 | 1,5 | 356 | 6,5 | 0,67 |
| Coudray - Cercanceaux | PRV A Vicat | 0,0 | 305 | 10 | 0,67 |
| Gouviard | CPJ 45 | 1,5 | 354 | 6,5 | 0,68 |
| La Croix Gibat | CPJ 45 | 0,5 | 355 | 5,5 | 0,70 |
| La Montagne Noire | Rolac 124 | 0,0 | 325 | 20 | 0,70 |
| Kervrahu | CPJ 45 | 1,0 | 365 | 10 | 0,70 |
| Gouviard | CPJ 45 | 2,5 | 348 | 17 | 0,72 |
| Saint-Denis d'Orques | CPJ 45 | 0,3 | 344 | 6 | 0,73 |
| | | | | moyenne | 0,64 |
| | | | | écart-type | 0,04 |

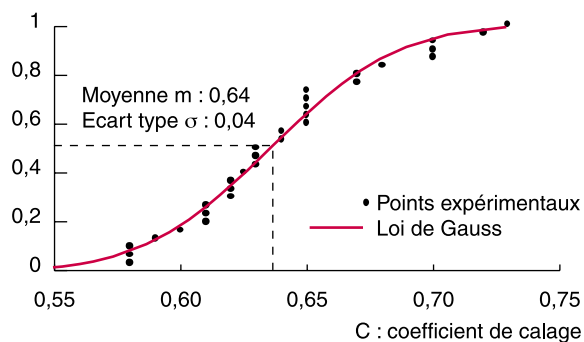


Fig. 10 - Répartition du coefficient de calage du BAUME par rapport à l'appareil de 1978.

On retient pour l'exploitation des essais réalisés avec le BAUME que la valeur du coefficient C de la relation (1) est $C = 0,65$.

La figure 11 montre que, pour un même matériau, les deux appareils conduisent au même délai de maniabilité.

Vérification de la définition du délai de maniabilité avec le « BAUME »

La vérification a été faite avec la grave-ciment Gouviard, sur laquelle ont été réalisés :

➤ l'essai Proctor-Modifié avec compactages différés,

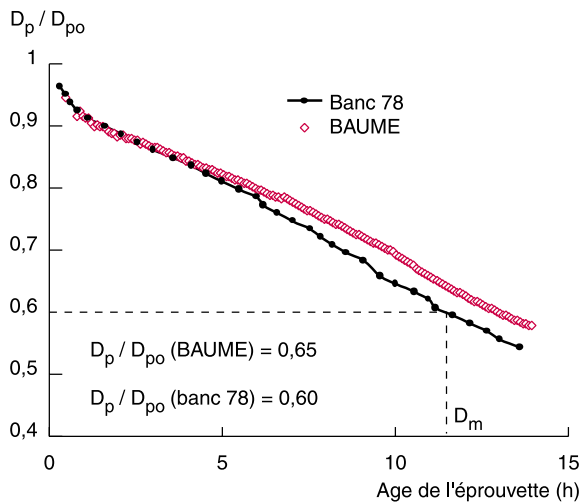


Fig. 11 - Comparaison entre l'appareil de 1978 et le BAUME.

- des essais de traction directe à 28 j sur des éprouvettes dont le compactage a été différé,
- l'auscultation dynamique au BAUME.

La figure 12 montre les résultats obtenus. La concordance entre la détermination du délai de maniabilité au BAUME et la diminution de 2 % de la masse volumique apparente sèche par compactage différé est très bonne ; par contre, l'augmentation de l' I_{QE} serait ici supérieure à 10 %.

Conclusion

Le délai de maniabilité des graves traitées aux liants hydrauliques est défini comme la durée, comptée à partir du malaxage, pendant laquelle la prise du liant restant nulle ou très faible, il est possible de procéder à sa mise en œuvre et à son compactage sans altération sensible de ses performances mécaniques à long terme. Si le compactage s'effectue au-delà, on peut noter des chutes de performances dont la compensation nécessiterait d'augmenter de plus de 10 % l'épaisseur équivalente de la couche définie par son indice de qualité élastique.

Il était donc indispensable de disposer d'un moyen simple de mesurer ce délai de maniabilité en laboratoire. C'est ainsi qu'a été créé en 1978 le premier banc d'auscultation dynamique des graves-ciment, dont le principe repose sur une évaluation de la rigidification du matériau par le suivi dans le temps de la propagation

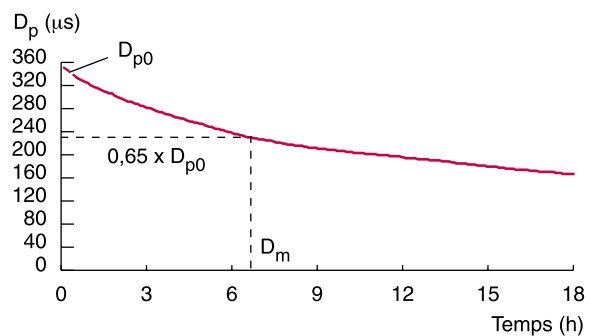
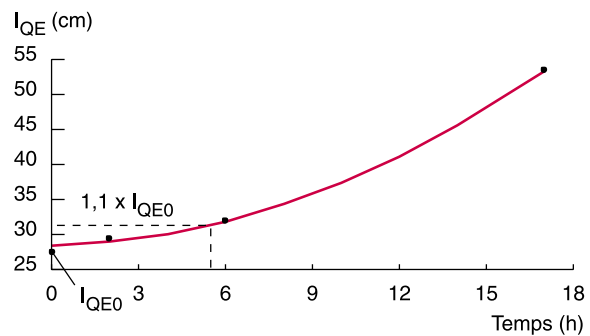
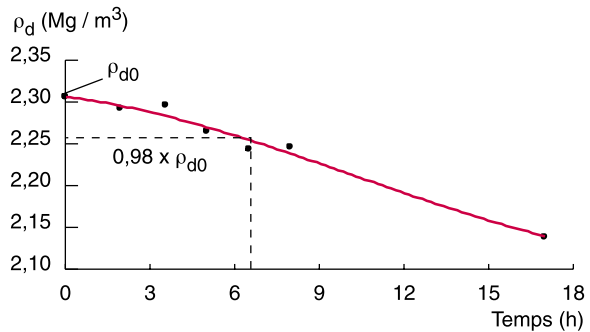


Fig. 12 - Comparaison entre l'auscultation dynamique au BAUME et les deux modes de définition du délai de maniabilité.

d'ondes ultrasonores à travers une éprouvette fraîchement compactée.

Une nouvelle version de l'appareillage, le BAUME, permet d'améliorer la conduite de l'essai et de traiter les résultats en temps réel, grâce notamment à l'apport de l'informatique. La détection de l'onde transmise à travers le matériau, et donc la détermination du temps de propagation, s'effectue directement par le logiciel, ce qui facilite la mesure et accroît sa précision. La qualification de cette nouvelle génération de matériel a été l'occasion de valider sur de nouveaux matériaux la méthode de détermination du délai de maniabilité par mesures soniques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- | | |
|---|--|
| <p>[1] <i>Le plan routier breton</i> (1996), Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées.</p> <p>[2] PAUTE J.-L. (1975), Maniabilité des graves-ciment – Auscultation dynamique des éprouvettes de grave-</p> | <p>ciment, <i>Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées</i>, 77, mai-juin.</p> <p>[3] ALEXANDRE J., BROCCOLI A., CIMPELLIC., PAUTE J.-L. (1978), <i>Propriétés générales des graves</i></p> |
|---|--|

- traitées par des ciments spéciaux et des retardateurs de prise*, Rapport de recherche LPC, **79**, juillet, LCPC.
- [4] Les graves-ciment (1979), *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, thématique, mars, LCPC.
- [5] SETRA-LCPC (1983), *Directive pour la réalisation des assises de chaussées en graves traitées aux liants hydrauliques*, Direction des Routes, Ministère des Transports, juin.
- [6] **NF P 98-231-5** (1997), *Détermination du délai de maniabilité des graves et des sables traités aux liants hydrauliques par compactage différé*, Norme Française, avril.
- [7] **NF P 98-231-6** (1997), *Détermination du délai de maniabilité des graves et des sables traités aux liants hydrauliques par auscultation dynamique*, Norme Française, avril.
- [8] DELMULLE J.-P., LABOIS G., FOSSE Y. (1997), *matériel MLPC BAUME*, CECP Rouen.
- [9] LABOIS G. (1997), *Notice d'utilisation du BAUME*, CECP Rouen.

ABSTRACT

The use of dynamic testing to determine the duration of workability of cement-bound granular materials

J.-L. PAUTE, O. HAMEURY, G. LABOIS

Cement-bound granular materials are rapid hardening road foundation materials requiring either the addition of a retarding agent during mixing or the use of special cementitious binders with slower setting kinetics than standard cement. This paper describes a laboratory method for determining the duration of workability of cement-bound granular material which involves the use of dynamic testing to measure changes in the stiffness of a specimen that was compacted immediately after mix manufacture. Exploitation of the test results is based on comparisons with mechanical strength tests and compaction tests.