

# L'influence des plaques supports sur le compactage des machines à fabriquer les blocs béton

Les produits en béton sont des produits largement répandus dans les secteurs de l'aménagement des routes, des espaces verts et paysagers et sont proposés dans des formes et des couleurs très variées.

L'essentiel des produits en béton fabriqués en Allemagne et en Europe est produit avec des machines à fabriquer les blocs béton, qui moulent et compactent les produits sur des plaques supports. Sur ces mêmes plaques supports, les produits sont ensuite transportés et stockés dans de hauts rayonnages.

La mise en forme et le compactage du mélange béton s'effectuent dans les machines à fabriquer les blocs moyennant un procédé par vibrations très intensif. Grâce aux mouvements coordonnés de modules définis du système de fabrication – les masses de travail, des chocs périodiques d'une intensité déterminée sont induits, puis transmis au mélange béton à compacter via le module de mise en forme. Les plaques supports font partie des masses de travail du système à vibrations d'une machine à fabriquer les blocs.

■ Dr.-Ing. Jörg-Henry Schwabe,  
Dipl.-Ing. Jürgen Martin, IFF Weimar, Allemagne ■

Ce système générateur de vibrations est un système complexe, d'une extrême importance pour la qualité finale des produits en béton.

L'interaction des masses de travail (éléments)

- table vibrante
- moule
- plaque support
- charge

détermine, parallèlement à la qualité du mélange béton, le résultat des opérations de moulage et de compactage et influe par là même sur les propriétés des produits fabriqués. La Fig.1 montre un modèle multi-masse discret simplifié du système à vibra-

tions d'une machine à fabriquer les blocs avec ses masses de travail. La zone en rouge illustre la masse de travail «plaque support». Le comportement vibratoire de la plaque support au sein du système à vibrations est fonction des dimensions ( $m^2$ ), de la rigidité et des propriétés d'amortissement de cette dernière ( $c_2, k_2, c_3, k_3, c_7, k_7$ ). Les plaques supports sont fabriquées et utilisées avec différents matériaux, différentes combinaisons de ces matériaux et suivant différentes structures. Les propriétés vibratoires des plaques supports et leur influence sur l'effet de compactage sont par conséquent différentes selon les propriétés des matériaux et de la structure.

C'est pourquoi les connaissances à suivre concernant la plaque support et ses caractéristiques pour l'assurance qualité des produits en béton fabriqués sont importantes pour l'utilisateur:

téristiques pour l'assurance qualité des produits en béton fabriqués sont importantes pour l'utilisateur:

- Quelles sont les propriétés (grandeurs caractéristiques) vibratoires de la plaque support qui influent sur le processus de compactage?
- Quelles sont les relations quantitatives entre les propriétés (grandeurs caractéristiques) influant sur le compactage et la qualité du compactage?
- Quelles sont les propriétés (grandeurs caractéristiques) vibratoires des plaques suivant leur conception?
- Comment évoluent les propriétés vibratoires de la plaque sur sa durée d'utilisation?

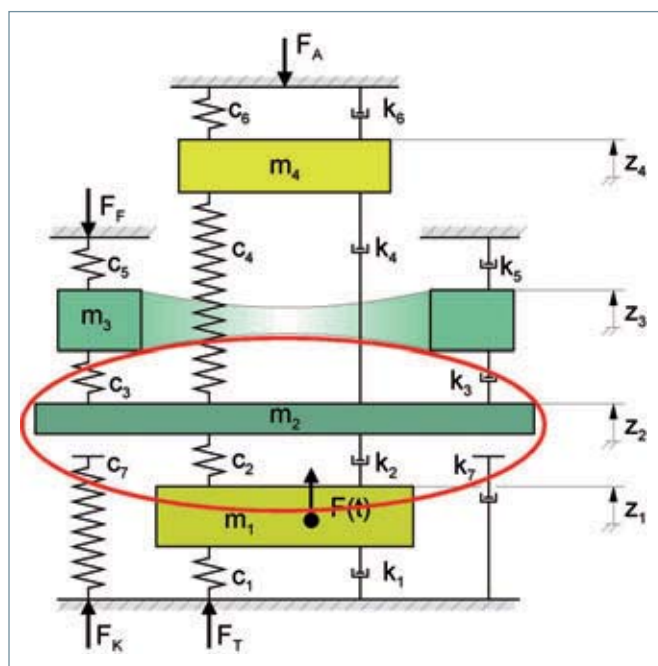


Fig. 1: Modèle multimasse discret du système à vibrations d'une machine à fabriquer les blocs

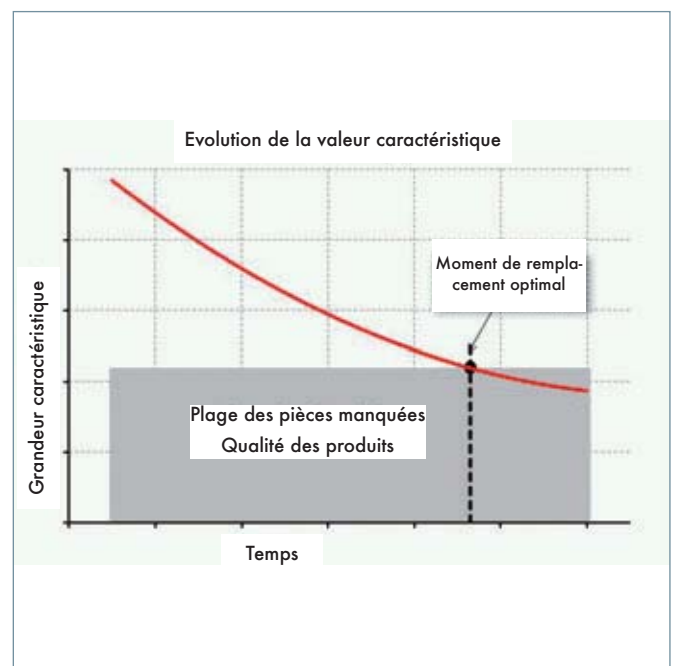


Fig. 2: Evolution des valeurs caractéristiques (hypothèse d'une évolution qualitative)

Pour les exploitants d'installations carrouselles avec machines à fabriquer les blocs béton, il est par exemple important de savoir quel est le moment favorable pour remplacer l'ensemble des plaques de l'installation. Les plaques supports sont sujettes, du fait des processus, à une forte usure et à un vieillissement. Il est donc prévisible que les propriétés vibratoires évoluent avec le temps d'utilisation.

Bien que les réglages des machines et le mélange béton demeurent inchangés, il est fréquent que la qualité des produits se dégrade du fait d'une transmission des vibrations et d'un effet de compactage altérés de la plaque support. Le remplacement des plaques supports améliore dans ce cas la situation de fabrication.

Mais le stock de plaques pour une installation carrousel, soit 3 000 à 5 000 unités, représente un investissement important que l'on souhaite voir durer longtemps.

Il serait donc avantageux de connaître l'évolution dans le temps des valeurs caractéristiques (voir hypothèse à la Fig. 2) de sorte à pouvoir prédire quand le stock de plaques doit être idéalement remplacé en vue d'une exploitation optimale des biens

d'investissement et de l'obtention de produits de qualité souhaitée. Bien qu'il existe de toute évidence une relation entre le matériau ou le type de matériau d'une plaque support, son état de vieillissement et d'usure et la qualité des produits à escompter, aucune grandeur caractéristique n'est connue à ce jour qui

- décrive objectivement l'état vibratoire des plaques supports,
- soit facilement mesurable et
- permette une prédiction suffisamment sûre de la qualité à escompter pour les produits.

L'objectif de l'étude décrite dans la partie à suivre a été de définir les grandeurs caractéristiques des plaques supports qui influent sur le compactage des mélanges. A partir de là, des grandeurs caractéristiques spécifiques aux différentes pièces usinées devaient pouvoir être déterminées.

Outre la détermination de grandeurs caractéristiques adaptées, il s'agissait également de définir la relation entre ces grandeurs caractéristiques et l'effet de compactage, ou encore la qualité des produits. La connaissance de la relation entre les valeurs



■ Dr.-Ing. Jörg-Henry Schwabe, 1988 à 1993 études de génie mécanique/mécanique appliquée, 2002 doctorat à l'Université Technique de Chemnitz, Allemagne. Depuis 1993, employé à l'Institut für Fertigteiletechnik und Fertigbau Weimar e. V. Travaille dans le domaine de la dynamique des machines de production des matériaux de construction, membre de la commission technique «Simulation of fresh concrete flow» de la RILEM. [j-h.schwabe@iff-weimar.de](mailto:j-h.schwabe@iff-weimar.de)



■ Dipl.-Ing. Jürgen Martin, 1975 à 1979 études de technologie électronique et de technique des appareils de précision, département Technologie des appareils, à l'Université Technique de Dresde, Allemagne. Depuis 1997, employé à l'Institut für Fertigteiletechnik und Fertigbau Weimar e. V. Depuis 04/2006, directeur adjoint du département de recherche Techniques de préfabrication à l'Institut für Fertigteiletechnik und Fertigbau Weimar e. V. Domaines de travail: conception et dimensionnement de machines pour la fabrication d'éléments de construction, en particulier de moules vibrants et de systèmes d'excitation. [j.martin@iff-weimar.de](mailto:j.martin@iff-weimar.de)

caractéristiques variables dans le temps et définissables des plaques et le résultat de compactage devait, de plus, permettre de développer un appareil de mesure pour les applications processus, capable d'aider les ouvriers à contrôler rapidement et facilement l'état des plaques supports.

## Grandeurs caractéristiques influant sur le compactage

L'effet de compactage par vibrations par chocs repose sur la génération de chocs périodiques entre la plaque support et la table par mouvements ascendants, ou entre la plaque support et les batteurs fixés au bâti par mouvements descendants, ou encore entre la plaque support et le moule. Compte tenu de la dynamique de ce processus, il convenait, pour la saisie de grandeurs caractéristiques, de prendre en considération les propriétés de la plaque support en rapport avec des grandeurs de mouvement et de force.

### Sélection des grandeurs caractéristiques

En vue du choix de grandeurs caractéristiques adaptées, l'influence spatiale des chocs processus a été étudiée dans le détail (voir Fig. 3). Concernant la déformation, les zones locales avec allongement, cisaillement et compression des matériaux sont reconnaissables visuellement, mais ne donnent aucune indication sur la part quantitative des types de contraintes à la déformation. Parmi les grandeurs caractéristiques influant sur le compactage et applicables, figurent dans un premier temps les grandeurs caractéristiques des matériaux.

C'est pourquoi l'on a songé à créer une grandeur caractéristique définissant la rigidité de la plaque support sous conditions de chocs qui

- tiennent compte des déformations complexes (compression, allongement) dues aux chocs,
- puisse être déterminée dans des conditions de mesure processus au milieu des interactions dynamiques entre force, déformation et vitesse de déformation et

- puisse être mesurée comme grandeur de mouvement et/ou de force.

Cette grandeur caractéristique sera désignée par la suite rigidité aux chocs  $S_K$ .

Une autre grandeur caractéristique possible est l'amortissement  $D$ , qui caractérise la conversion de l'énergie vibratoire en une autre forme d'énergie – généralement la chaleur – et se calcule à partir de grandeurs de mouvement dépendant du temps.

### Description des grandeurs caractéristiques

Pour déterminer ces grandeurs caractéristiques adaptées

- rigidité aux chocs  $S_K$  et
- amortissement  $D$ ,

le principe de mesure suivant a été adopté. Sur la surface opératoire de la plaque support (objet mesuré) sont induits des effets dynamiques qui engendrent des déformations et des vitesses de déformation comme avec les vibrations par chocs. Au point de contact, ou à proximité immédiate, les forces et les mouvements fonction du temps sont saisis et enregistrés par mesures. La plaque support est logée de telle sorte à ce que des déformations locales (par ex. une flexion de la plaque) ne puisse en aucun cas se produire.

Plusieurs solutions de procédé de mesure ont été élaborées à partir de ce principe, dont le procédé de mesure dit de la «masse tombante», lequel a été tout d'abord expérimenté dans une variante de laboratoire, puis développé en un prototype opératoire d'un appareil de mesure processus. Le procédé de mesure de la «masse tombante» est très proche de par son fonctionnement du principe de fabrication par vibrations par chocs (voir Fig. 4). La plaque support est ce faisant fixée sur un support résistant aux vibrations, côté opposé à celui du point

de mesure. Une masse tombante de masse  $m$  tombe, sous l'effet de la gravitation, d'une hauteur  $h_0$  et heurte à la vitesse  $v$  le corps d'épreuve, c.-à-d. la plaque support. La masse  $m$  de la masse tombante et la hauteur de chute  $h_0$  sont calculées de sorte à obtenir des déformations et des vitesses de déformation comparables à celles survenant durant le processus de compactage par vibrations par chocs. La masse tombante est ralentie et rebondit suivant les propriétés de rigidité et d'amortissement de la plaque support. Après une phase d'envol, le processus se répète plusieurs fois jusqu'à l'arrêt de la masse tombante. Les mouvements du corps tombant sont saisis comme comportement dans le temps de l'accélération par un capteur d'accélération disposant d'un taux de balayage suffisant, avec à la clé un tracé en fonction du temps tel que dans l'exemple de la Fig. 5. Ces données primaires permettent de déterminer les propriétés de rigidité et d'amortissement de la plaque support de la manière qui suit.

### Propriété de rigidité – rigidité aux chocs $S_K$

La hauteur de la première impulsion de choc  $\hat{a}_1$  dépend dans une large mesure des propriétés de rigidité des deux partenaires de choc. La rigidité de la masse tombante étant supposée être bien supérieure à celle de la plaque support (ce qui est le cas pour toutes les plaques en bois et en matériaux synthétiques connues), la hauteur de la première impulsion de choc dépend donc essentiellement de la rigidité de la plaque support. Ce n'est qu'avec les plaques supports métalliques que les rigidités des deux partenaires de choc sont similaires. Outre les propriétés des matériaux, les propriétés structurelles du spécimen déterminent également sa rigidité. Avec un corps plein

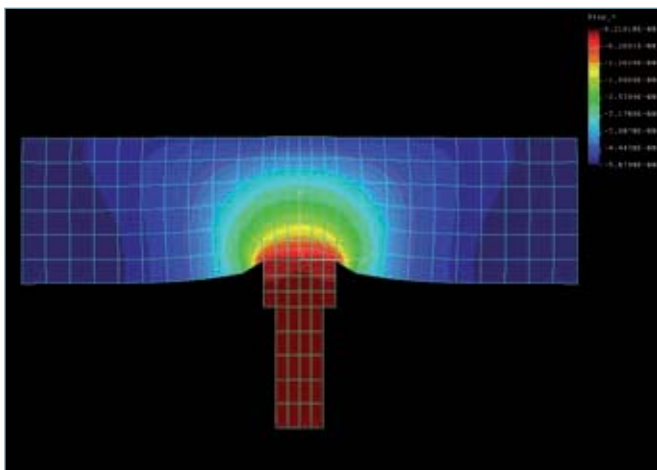


Fig. 3: Calculs des déformations dues aux chocs entre la plaque support et la table

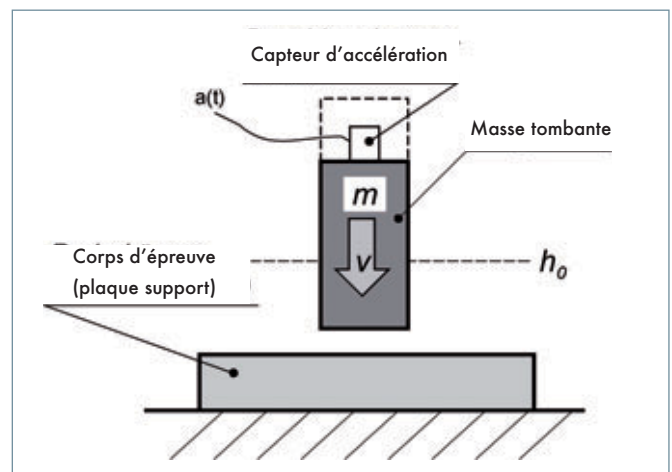


Fig. 4: Schéma du principe de fonctionnement de la «masse tombante»

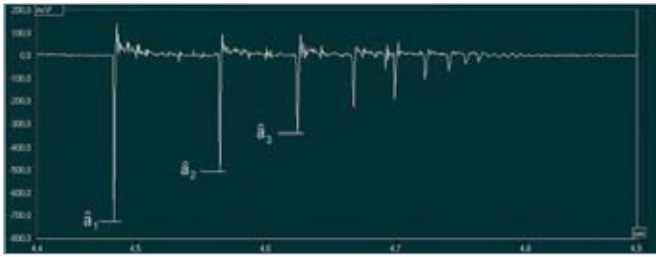


Fig. 5: Enregistrement de l'évolution dans le temps de l'accélération (exemple de mesure)

homogène, il s'agit, dans la méthode de mesure décrite, de l'épaisseur de la plaque. La hauteur de la première impulsion de choc  $\hat{a}_1$  constitue donc un paramètre aisément définissable par mesures et qui caractérise la rigidité aux chocs  $S_K$  de la plaque support.

$$S_K \sim \hat{a}_1$$

#### Propriété d'amortissement – amortissement des chocs D

L'amortissement D se calcule comme rapport d'amplitude linéaire  $\Delta\hat{a}_{rel}$  ou comme décrément algorithmique  $\Lambda$  à partir des valeurs de la première et de la deuxième ou de la n-ième et de la (n+1)-ième amplitude d'accélération.

$$\Delta\hat{a}_{rel} = \frac{\hat{a}_1 - \hat{a}_2}{\hat{a}_1} = \frac{\hat{a}_n - \hat{a}_{n+1}}{\hat{a}_n}$$

$$\Lambda = \ln\left(\frac{\hat{a}_n}{\hat{a}_{n+1}}\right)$$

$$D \sim \Delta\hat{a}_{rel} \quad \text{or} \quad D \sim \Lambda$$

#### Mesure des grandeurs caractéristiques

Pour la mise en pratique du procédé de mesure et la détermination de valeurs caractéristiques spécifiques aux différentes pièces usinées, un dispositif de mesure de laboratoire a été élaboré (voir la Fig. 6). Des valeurs caractéristiques pour plaques supports ont été déterminées par le biais de séries de mesures.



Fig. 6: Vue du dispositif d'essai de laboratoire

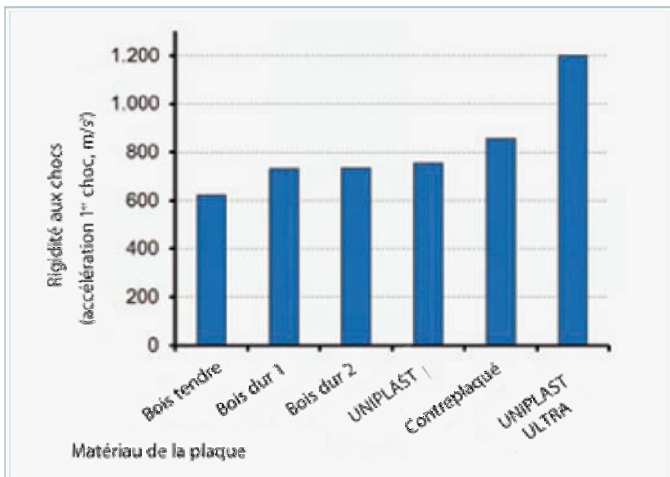


Fig. 7: Rigidity to impact as a function of the material of the plate

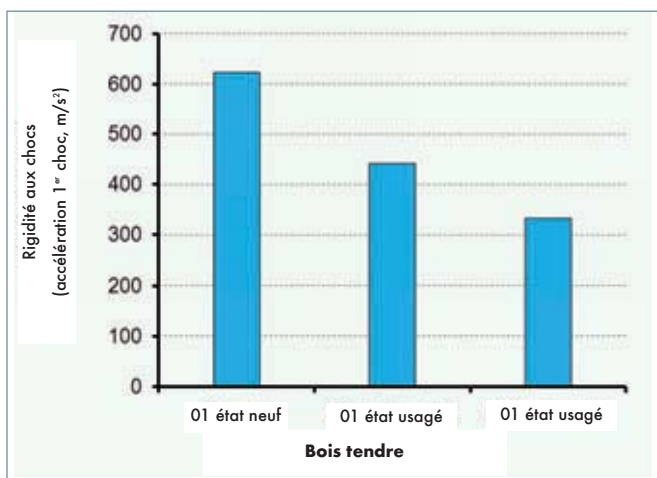


Fig. 8: Rigidity to impact as a function of the duration of use of softwood plates

Des facteurs d'influence tels que

- le matériau
- la teneur en humidité (pour les plaques en bois)
- l'âge et le taux d'utilisation

ont été ce faisant étudiés. Les diagrammes à suivre illustrent certains des résultats de ces mesures destinées à la détermination de valeurs

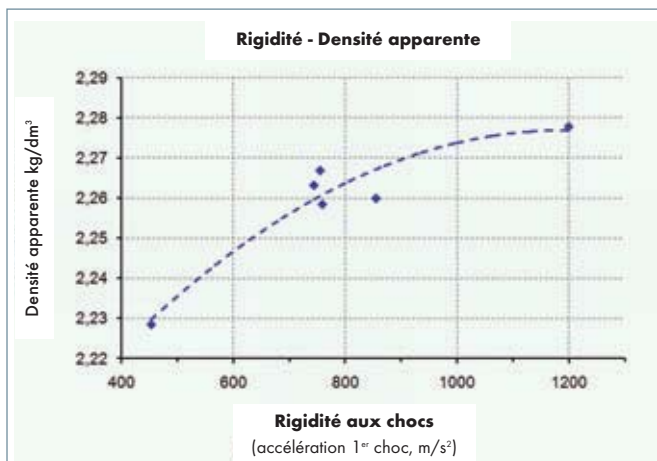


Fig. 9: Effect of compaction (apparent density) as a function of the rigidity to impact

caractéristiques. Le diagramme de la Fig. 7 illustre à titre d'exemple les valeurs caractéristiques de rigidité déterminées à partir de l'amplitude d'accélération du premier choc pour différents matériaux. Dans le diagramme de la Fig. 8 sont représentées les valeurs caractéristiques de plaques supports en bois tendre avec différentes durées d'utilisation.

#### Relation grandeur caractéristique – effet de compactage/qualité des produits

Les plaques supports mesurées ont été intégrées à des machines à fabriquer les blocs et utilisées pour la fabrication de pavés en béton dont la densité apparente et la résistance en compression ont été ensuite contrôlées. Les blocs béton ont été fabriqués sur deux différentes machines de fabrication, paramétrées chacune de façon spécifique. Le diagramme de la Fig. 9 représente la relation entre la rigidité aux chocs et l'effet de compactage avec comme critère d'évaluation la densité apparente. Les points de mesure constituent les valeurs moyennes de la densité apparente de plusieurs pavés fabriqués sur un type déterminé de plaque support (bois tendre, bois dur, matériau synthétique). Le diagramme vaut exclusivement pour le réglage de la machine sélectionné.

#### Résumé des grandeurs caractéristiques déterminées

Grâce au procédé de mesure de la masse tombante décrit ici, il est possible, à partir d'effets mécaniques spécifiques induits sur une plaque support et de la mesure des grandeurs de mouvement fonction du temps durant ces effets, de définir des grandeurs caractéristiques qui décrivent les propriétés vibratoires de cette plaque support en considération du procédé de fabrication par vibrations par chocs utilisé pour la production des blocs béton. Les grandeurs suivantes ont été définies comme adaptées et mesurables:

- la première amplitude d'accélération  $\hat{a}_1$ , laquelle caractérise la rigidité de la plaque, désignée ici rigidité aux chocs  $S_K$
- le rapport d'amplitude linéaire  $\Delta\hat{a}_{rel}$  ou le décrement algorithmique  $\Lambda$ , lesquels caractérisent les propriétés d'amortissement D de la plaque.

Les valeurs caractéristiques déterminées au cours des essais de laboratoire et à petite échelle se réfèrent aux types courants de plaques supports. L'influence du matériau de la plaque, de la teneur en humidité et de la durée d'utilisation sur les propriétés vibratoires de la plaque support a été étudiée.

Au cours d'essais de mise en forme sur des machines à paramètres constants, les relations quantitatives entre la grandeur caractéristique rigidité aux chocs  $S_K$  et l'effet de compactage, ou la résistance en compression des produits (pavés en béton), ont été déterminées.

#### Appareil de mesure pour les usines de fabrication de béton

Pour une applicabilité processus du procédé de mesure, un dispositif de mesure a été élaboré, fabriqué et testé dans des conditions industrielles. Le dispositif de mesure est conçu pour les machines à fabriquer les blocs intégrées à une installation carrousel et comprend 3 têtes de capteur pour la mesure des propriétés de la plaque en plusieurs points de la plaque support. La Fig.10 montre le modèle CAO d'une tête de capteur avec description des principaux composants pour la réalisation du procédé de mesure. La Fig. 11 illustre le dispositif de mesure fini avant son installation dans la machine à fabriquer les blocs. La première série d'essais a porté sur le mesurage de 200 plaques supports en bois tendre (pin) et une durée d'utilisation de 2,75 ans.



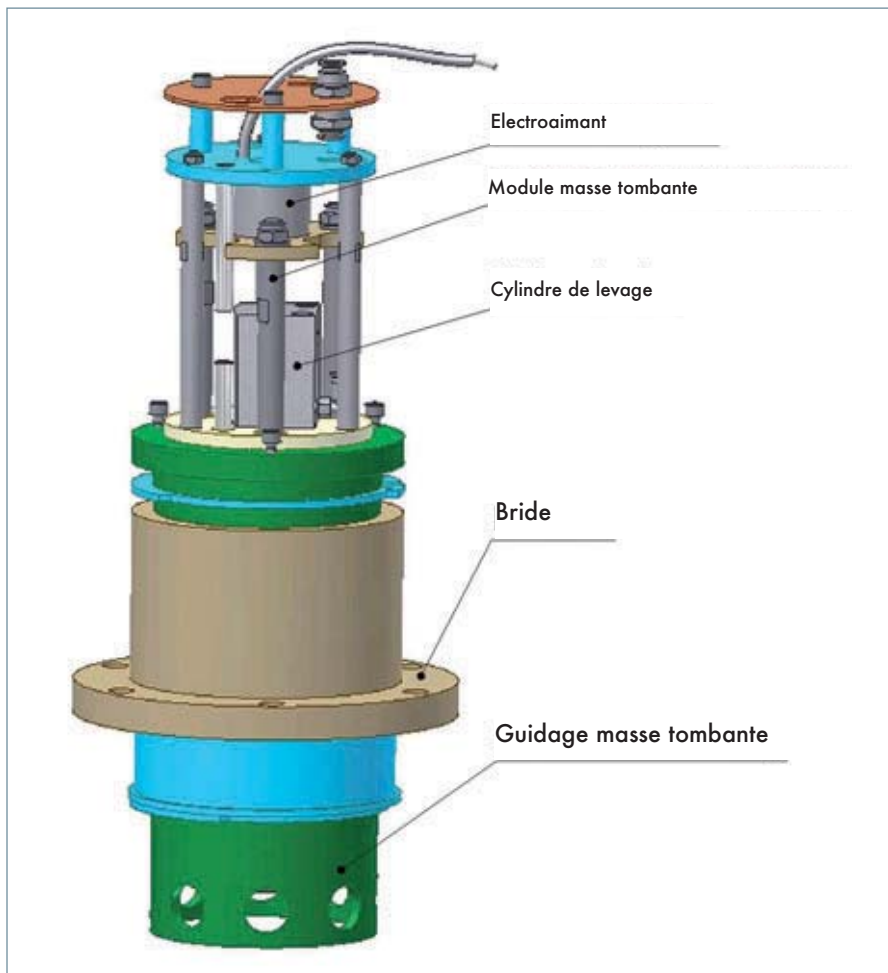


Fig. 10: Vue du modèle CAO d'une tête de capteur

L'analyse statistique a fourni les résultats suivants:

- valeur moyenne  $457 \text{ m/s}^2$
- écart standard  $89,7 \text{ m/s}^2$

D'autres séries de mesure sont prévues pour 2010 en vue de la saisie des valeurs caractéristiques de l'ensemble des plaques. Afin d'étudier le comportement dans le temps des valeurs caractéristiques, d'autres

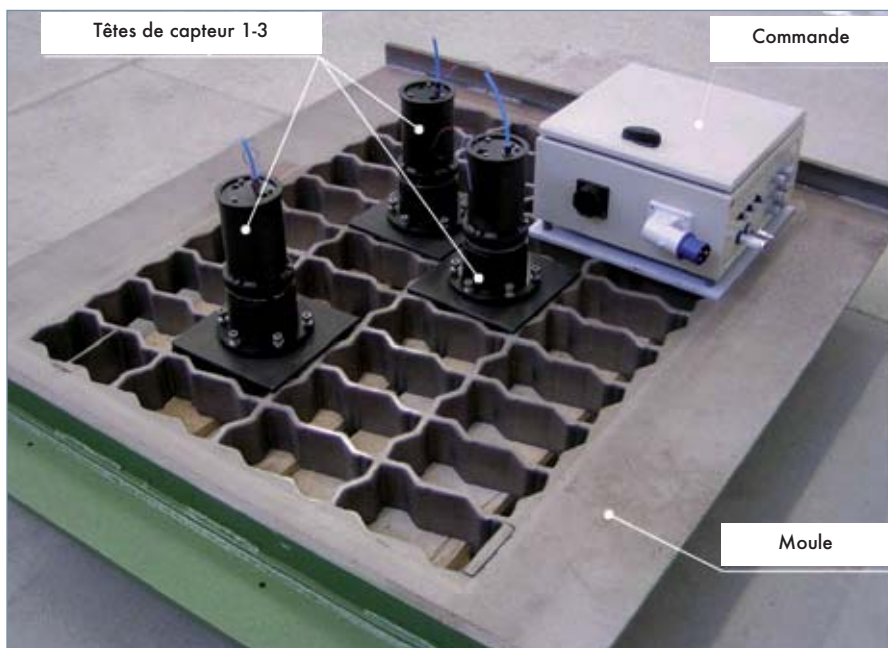


Fig. 11: Vue du dispositif de mesure fini



Fig. 12: Vue du dispositif de mesure dans la machine à fabriquer les blocs

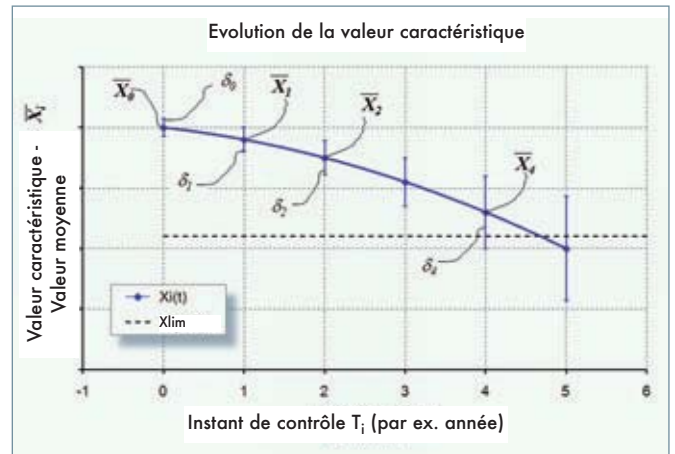


Fig. 13: Evolution des valeurs caractéristiques d'un stock de plaques (hypothèse donnée à titre d'exemple)

mesures seront effectuées à intervalles de temps cycliques.

### Possibilités d'application du procédé de mesure

Le procédé de mesure élaboré présente un avantage autant pour les fabricants de plaques supports que pour les utilisateurs dans les usines de fabrication de béton.

Pour les fabricants de plaques supports, les possibilités d'application sont les suivantes:

- mesure et évaluation des propriétés dynamiques des plaques dans l'usine de fabrication et chez le client comme contrôle qualité ou attestation de la qualité
- attestation des propriétés vibratoires en cas de livraison de remplacement de plaques supports (par ex. en cas de besoins de remplacement en petites quantités) pour les installations de fabrication en place
- fabrication et livraison de plaques supports aux propriétés définies et adaptées aux propriétés des autres masses de travail du système à vibrations.

Pour les exploitants de machines à fabriquer les blocs, les possibilités d'application sont entre autres les suivantes:

- choix des plaques supports en fonction des machines et des procédés utilisés et de la qualité souhaitée pour les produits dès la phase d'étude
- identification des plaques supports à effet de compactage insuffisant, le cas échéant, élimination sélective/remplacement sélectif
- saisie et évaluation de l'évolution dans le temps des propriétés des plaques au travers de mesures cycliques, et prédiction du moment optimal pour remplacer le stock complet de plaques (voir également le diagramme 13).

La connaissance de l'évolution dans le temps des valeurs caractéristiques avec valeurs moyennes et dispersion peut aider, avec des valeurs de mesure objectives, à choisir le moment le plus approprié pour remplacer les plaques.

### Résumé

Des grandeurs caractéristiques des propriétés vibratoires des plaques supports ont pu être définies. Des procédés et des dispositifs de mesure destinés à la détermination de ces valeurs caractéristiques ont été élaborés et essayés.

Les fabricants et les utilisateurs des plaques supports peuvent disposer ainsi de valeurs de mesure objectives concernant les propriétés des plaques influant sur le compactage.

Les résultats de l'étude ont été acquis dans le cadre d'un projet de recherche en coopération avec les entreprises

- Fritz Herrmann GmbH & Co., Betonsteinwerke KG, Eisenberg
- Wasa Pallets GmbH & Co. KG, Neubrunn
- Institut für Fertigertechnik und Fertigbau Weimar e.V., 99423 Weimar, Allemagne.

Le projet de recherche a été subventionné par le Ministère Fédéral allemand de l'Economie et de la Technologie (référence subvention KF 0031713UK7) dans le cadre du programme «PROgramm INNOvationskompetenz mittelständischer Unternehmen» (PRO INNO) pour le développement des compétences d'innovation dans les petites et moyennes entreprises.

### ■ Bibliographie

- [1] Kuch, H.; Schwabe, J.-H.; Palzer, U.: Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen – Verfahren und Ausrüstungen, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf 2009

### AUTRES INFORMATIONS



IFF Institut für Fertigertechnik und Fertigbau Weimar e.V.  
Cranachstr. 46  
99423 Weimar, Allemagne  
T +49 3643 86840  
F +49 3643 868413  
kontakt@iff-weimar.de  
www.iff-weimar.de