

Concepts innovateurs de mélange pour fabrication pratique de béton haute performance sur des mélangeurs standard

Dans le département spécialisé WIB (Werkstoffe im Bauwesen = matériaux utilisés dans la construction) de l'Institut für Massivbau de la TU Darmstadt (Université Technique), on procède à des développements d'installations et de processus techniques. Ceci afin d'adapter ou d'équiper des mélangeurs existants aux exigences des mélanges de telle sorte que même les recettes de mélange les plus compliquées (BAC, BHP et BUHP) puissent être réalisées avec un mélangeur standard équipé en conséquence. Dans les études ci-dessous, on va analyser les exigences particulières de compositions de mélanges riches en fines et pauvres en eau posées au processus de mélange. De même on va exposer différentes méthodes innovatrices liées aux installations et aux processus, qui permettent de dissoudre de manière optimale les (ultra) fines et d'homogénéiser complètement le mélange complet en une durée minimum. On a construit pour ce faire au laboratoire de recherche de la TUD une installation de malaxage pilote présentant deux systèmes de mélange différents. Ainsi, un système à malaxeur à deux arbres à palettes conventionnel a été acheté ainsi qu'un système à mélangeur conique. Le laboratoire fut également complété d'un mélangeur colloïdal pour la réalisation de processus de mélange particulièrement intensifs au niveau énergie. Tous les appareils du WIB ont été équipés de la toute dernière génération de convertisseurs de fréquence et de moteurs particulièrement puissants, pour pouvoir réaliser de manière optimale même les bétons les plus exigeants. La technologie désormais disponible en laboratoire de recherche est mise en œuvre pour analyser en détail les exigences posées aux processus de mélange et pour développer des régimes de mélange pour résoudre les problèmes spécifiques du béton. L'objectif final est de transférer les connaissances acquises dans le laboratoire de mélange sur des grandes installations de mélange.

■ Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht, Dipl.-Ing. Christian Baumert, TU Darmstadt, Allemagne ■

Efficacité de malaxage des systèmes de mélange du béton

Le contrôle de l'efficacité de malaxage des mélangeurs de béton s'effectue selon le procédé décrit dans la norme DIN 459-1: 1995-11 « Machines et matériels pour la construction des bâtiments – Mélangeurs pour béton et mortier » et dans ISO 18650-2: 2006-04 « Machines et matériels pour la construction des bâtiments - Malaxeurs de béton - Mode opératoire pour la détermination de l'efficacité de malaxage ». Ainsi, la norme DIN 459-2 prévoit le contrôle de l'homogénéité du mélange de béton par une comparaison de composants définis du mélange sur des échantillons de béton frais. À cette fin, on se rapporte aux propriétés des mélanges de référence. Les compositions de béton frais dont les propriétés correspondent à celles de bétons normaux sont considérées comme des références. Si les bétons haute performance modernes sont contrôlés conformément à la norme DIN 459-2, leurs compositions de mélange et leurs propriétés de béton frais diffèrent considérablement de celles des bétons normaux.

Plus particulièrement dans le cas de bétons modernes comme les bétons autocompactants (BAC), les bétons haute performance (BHP) et les bétons à ultra hautes perfor-

mances (BUHP), on utilise des compositions de mélanges plus riches en (ultra) fines et plus pauvres en eau si on les compare à celles de bétons normaux, ce qui fait que l'énergie de malaxage nécessaire à leur fabrication est nettement plus élevée. La norme DIN EN 206 exige une apparence homogène du béton frais. Le BAC, le BHP et le BUHP présentent une forte teneur en fines et seule une faible quantité d'eau de gâchage mêlée d'additifs pour béton hautement efficaces est ajoutée au mélange. Le processus de mélange est soumis à des exigences particulièrement élevées pour la dissolution complète de toutes les (ultra) fines et pour leur brassage et homogénéisation internes, ainsi que pour l'humidification complète de toutes les surfaces des substances solides avec l'eau de gâchage et les additifs liquides. Par contre, les fractions granulométriques plus grossières sont moins critiques en ce qui concerne le processus de mélange.

En raison de haut apport d'énergie nécessaire à la réalisation du BUHP, la plupart des instituts de recherche participant au programme de priorité DFG SPP 1182 « Constructions durables avec le béton à ultra hautes performances (BUHP) » misent sur un système de mélange intensif Eirich. Les hautes vitesses de l'outil de mélange garantissent un processus de mélange dispersif, permettant ainsi une bonne homogénéisation des fines ainsi qu'une séparation des fins composants du mélange.

Objectifs des travaux de recherche au WIB

Dans le cadre des travaux de recherche actuels du département spécialisé WIB (Werkstoffe im Bauwesen = matériaux utilisés dans la construction) de l'Institut für Massivbau à l'Université Technique de Darmstadt, on procède à des développements d'installations et de processus techniques. Ces réalisations sont destinées à adapter ou équiper des mélangeurs existants aux exigences des mélanges de telle sorte que même les recettes de mélange les plus compliquées (BAC, BHP et BUHP) puissent être réalisées avec un mélangeur standard équipé en conséquence.

Ainsi, le laboratoire de recherche a été équipé d'un malaxeur à deux arbres à palettes, d'un mélangeur conique et d'un mélangeur colloïdal pour être en mesure d'analyser les différences éventuelles dans les temps de mélange requis pour la réalisation de bétons haute performance. La qualité de mélange des systèmes standard est en grande partie définie par l'homogénéité des matériaux de base, ceux-ci étant dans la pratique constamment soumis à des variations. Pour obtenir la dissolution optimale des (ultra) fines, des analyses poussées ont été effectuées au WIB avec des mélangeurs colloïdaux, ceux-ci permettant d'atteindre des régimes moteur élevés et une grande puissance d'entraînement. Un processus de mélange à deux étapes peut être



■ Prof. Dr. Ing. Harald Garrecht, Université Technique de Darmstadt. Études en génie civil à l'Université de Karlsruhe, 1985 - 1992 collaborateur scientifique à l'Institut für Massivbau und Baustofftechnologie de l'Université de Karlsruhe, 1992 doctorat, 1992 - 1998 ingénieur en chef du département de la technologie de construction à l'Institut susnommé, 1998 professeur en matériaux de construction, physique du bâtiment et construction à la Haute École de Karlsruhe – Technique et économie, depuis 2006 professeur en matériaux de construction à l'Université Technique de Darmstadt, Institut für Massivbau.
garrecht@massivbau.tu-darmstadt.de



■ Dipl. Ing. Dipl-Ing (FH) Christian Baumert. Études en génie civil à la Haute École de Münster, 2001 – 2003 activités de planification de construction, études en génie civil à l'Université Technique de Braunschweig, depuis 2007 collaborateur scientifique au WIB avec spécialisation en technologie de construction massive.

baumert@massivbau.tu-darmstadt.de

réalisé en équipant une installation de mélange standard d'un mélangeur colloïdal relativement bon marché. Ainsi, les constituants farineux sont tout d'abord dissolus avec l'eau et les additifs pour béton hautement efficaces. La suspension ainsi obtenue est ajoutée au mélangeur standard puis mélangée aux granulats restant à ajouter. On garantit ainsi des durées de mélange brèves avec qualité optimale de mélange.

Pour commander les trois mélangeurs utilisés au WIB, on utilise les convertisseurs de fréquence les plus modernes qui, combinés à la saisie et l'évaluation assistées par ordinateur des données de moteur, permettent un fonctionnement de malaxage optimal.

Exigences posées aux mélangeurs pour la réalisation de bétons haute performance

Les bétons haute performance sont actuellement des bétons qui présentent les caractéristiques les plus diverses de performances exceptionnelles. Alors que les bétons autocompactants ont été développés sur base de leurs propriétés d'écoulement particulières, les mélanges haute performance se distinguent principalement par des résistances à la compression nettement plus élevées que celles de bétons normaux. Si l'accent est mis sur la grande durabilité, les bétons pouzzolaniques (p.ex. les bétons à haute teneur en cendres volantes) constituent une alternative intéressante en terme de technologie du béton.

Les compositions des bétons haute performance se distinguent fondamentalement de celles des bétons normaux, en fonction des caractéristiques relatives aux performances qui leur sont attribuées. Ainsi, les recettes des bétons haute performance se caractérisent par une teneur (nettement) plus forte en (ultra) fines, une teneur en eau souvent réduite par rapport à celle des bétons normaux et l'ajout de quantités accrues de superfluidifiant. Outre la dissolution complète et la séparation des (ultra) fines, une grande importance est également accordée à la répartition homogène des composants liquides, de l'eau de gâchage et des adjuvants chimiques hautement efficaces. En effet, ces composants doivent lors du mélange être amenés sur toutes les surfaces des particules solides ajoutées.

Technique de mélange

Le contrôle de l'efficacité de malaxage d'un mélangeur à béton doit être effectué sur base de trois bétons d'essai, conformément à la norme DIN 459-2. Un nombre défini d'échantillons est prélevé sur ces trois mélanges, à partir desquels il faut définir la teneur en eau et la consistance ainsi que la teneur en substances solides par une analyse de criblage. L'évaluation du mélange obtenu par un système de malaxage se fait sur base de coefficients de variation

qui sont à définir pour chaque constituant de la composition du mélange. Les compositions des bétons d'essai sont à formuler comme des systèmes à 3 composants selon la norme DIN 459-2. Elles se distinguent fondamentalement des compositions de mélange des bétons haute performance actuels en raison de leur faible teneur en fines, de leur haute valeur e/c et de l'absence d'utilisation de superfluidifiants.

Si les substances solides des bétons normaux à plus faible teneur en fines se laissent mélanger à fond et homogénéiser sans grands efforts, il faut tenir compte des particularités liées aux mouvements de mélange des produits lors du mélange de bétons haute performance. Selon [1], on relève deux mouvements de mélange des produits différents lors du malaxage de compositions riches en fines. Alors que les constituants grossiers se laissent facilement mélanger à fond par les mouvements de mélange convectifs, la part dispersive du processus de mélange se voit attribuer une grande importance dans le cas de compositions de mélanges riches en fines. Celle-ci se caractérise par la rencontre fortuite des particules fines (mélange fin) qui permet une dissolution des agglomérats et avec elle la séparation des particules les plus fines. Ainsi, ce ne sont pas uniquement les constituants grossiers qui se répartissent de manière homogène, mais également les (ultra) fines dans le mélange. Une comparaison des bétons frais selon la norme DIN 459-2 ne permet que des déclarations sur l'homogénéité de la granulométrie. Il n'est pas possible selon la norme DIN 459-2 d'évaluer dans quelle mesure un système de mélange peut garantir le brassage, l'homogénéisation et la séparation des (ultra) fines contenues dans le mélange. De ce fait, la méthode d'essai éprouvée pour les bétons normaux permettant d'évaluer l'efficacité des systèmes de mélange ne s'applique pas à des bétons haute performance qui sont en règle générale des systèmes à 5 ou 6 composants.

Les mélanges pour les bétons haute performance plus riches en (ultra) fines et plus pauvres en eau nécessitent une part accrue de transport dispersif lors du mélange, afin d'obtenir l'apparence homogène requise selon la norme DIN EN 206. Par contre, la répartition grossière y perd en importance. Dans la plupart des mélangeurs, les outils de mélange assurent tant le transport du produit à mélanger (répartition grossière) que le processus de mélange lui-même (répartition fine). Selon [2] et [3], l'addition lente d'eau, une vitesse d'outil et une durée de malaxage adaptées à la taille du mélangeur, une distance optimale entre l'outil

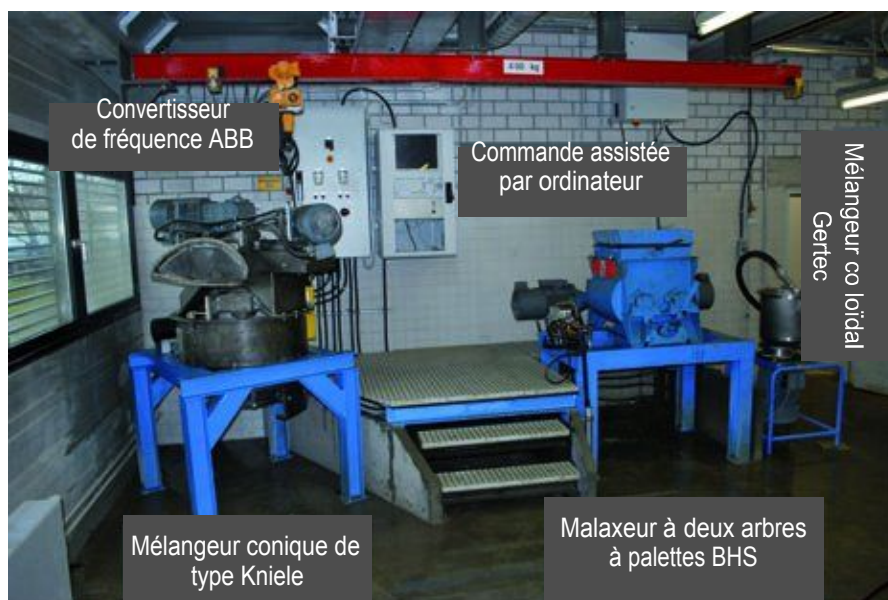


Fig. 1: installation de mélange à l'Institut für Massivbau à l'Université Technique de Darmstadt.

de malaxage et les parois du mélangeur et une largeur optimale de l'outil de malaxage sont nécessaires pour obtenir une qualité homogène et élevée de mélange pour les malaxeurs à cuve et à plateau.

La réalisation de BUHP en particulier exige un système de mélange de haute qualité dont les outils de malaxage sont parfaitement adaptés aux exigences du mélange en ce qui concerne la forme et la disposition ainsi que le mode de fonctionnement. Dans le cadre du programme de priorité SPP 1182 (BUHP) sponsorisé par la Fondation allemande pour la recherche (DFG), la plupart des organismes de recherche participants ont opté pour l'utilisation du mélangeur intensif de type Eirich. Dans ce système, le produit à mélanger est transporté vers le haut via une cuve de mélange inclinée et rotative, par frottement sur les parois, puis retombe en raison de la gravité et de la disposition des raclers. Le produit à mélanger ainsi transporté à l'intérieur de la cuve de mélange est alors ajouté au processus proprement dit de mélange qui est pris en charge par un agitateur à rotation rapide et disposition excentrée. En alternative à l'utilisation de ce type de système de mélange intensif, le département spécialisé WIB de l'Université Technique de Darmstadt procède à des développements technologiques permettant de réaliser des bétons haute performance élaborés même avec les systèmes de mélange standard que l'on trouve couramment sur le marché. Pour ce faire, il faut procéder aux adaptations et modifications techniques les plus diverses à l'installation pour pouvoir réaliser aussi de manière ciblée les compositions de bétons haute performance qui sont plus riches en fines et

plus pauvres en eau que les bétons normaux. Outre l'obtention d'une qualité de mélange optimale, l'exigence est ici également le respect de durées de mélange aussi courtes que possible afin de réduire la consommation d'énergie.

En ce qui concerne les installations, l'accent des recherches et développements porte sur la mise en œuvre de systèmes de régulation et de mesure des plus modernes sur la durée continue du processus de mélange. Afin de mesurer et évaluer en permanence les propriétés rhéologiques du mélange qui dépendent de l'addition de chaque composant individuel. L'adaptation continue de l'exploitation des outils de malaxage disponibles (choix, sens de rotation, vitesse de rotation) conduit à un brassage optimal du produit à mélanger en ce qui concerne l'homogénéisation et la durée. Cependant, les systèmes de mélange standard ne permettent qu'une quantité limitée d'apport énergétique via des outils de mélange standard. Ainsi, des extensions sont mises en œuvre au cours des essais des installations afin de mélanger à fond et dissoudre les parts de mélange riches en fines avec les composants liquides à ajouter.

Avec une méthodologie à deux étapes de la fabrication de béton frais, on peut réaliser en premier les processus de mélange dispersifs de manière économique et efficace au niveau énergie, en dissolvant et homogénéisant les (ultra) fines de manière optimale avec l'eau de gâchage et les additifs pour béton hautement efficaces. La suspension ainsi préparée peut alors être ajoutée dans le mélangeur standard dans lequel les fractions plus grossières du gra-

nulat peuvent être mélangées à fond avec ladite suspension par mouvements de mélange convectifs, moyennant une durée de mélange usuelle pour des bétons normaux.

La fig. 1 montre les technologies de mélange disponibles à l'Institut für Massivbau. La partie droite de la figure montre un malaxeur à deux arbres à palettes et un mélangeur colloïdal. Le malaxeur à deux arbres à palettes est représentatif de toute la gamme de systèmes de mélange que l'on retrouve dans les mélangeurs standard. Le mélangeur colloïdal permet d'obtenir une dissolution optimale des (ultra) fines et des composants liquides. La commande des deux systèmes de mélange est assurée par la dernière génération de convertisseurs de fréquence qui permettent la lecture continue des données de puissance et de régime des moteurs d'entraînement à ventilation forcée. La partie gauche de la figure montre un mélangeur conique (société Kniele).

En raison de sa structure spécifique et de ses deux outils de mélange indépendants l'un de l'autre, celui-ci confère une haute énergie au produit à mélanger. Ainsi, il est également possible de réaliser des bétons haute performance avec des mélangeurs coniques de type Kniele sans devoir procéder à un mélange préalable des (ultra) fines avec les composants liquides. Avant d'expliquer plus en détail la réalisation en deux étapes des bétons haute performance avec le mélangeur colloïdal et le malaxeur à deux arbres à palettes, le mélangeur conique de type Kniele va d'abord être passé à la loupe. Comme la fig. 2 le montre, on trouve un arbre de mélange vertical au centre de la cuve. Des racleurs externes sont

aménagés sur les parois de la cuve, ils fonctionnent dans le même sens ou dans le sens opposé de celui de l'arbre de mélange interne. L'arbre de mélange interne peut être adapté aux exigences spécifiques du produit à mélanger via le nombre, la taille, l'écart et l'inclinaison des outils de mélange. Dans l'exécution réalisée au WIB, l'arbre de mélange interne et le racleur externe peuvent être réglés au gré par convertisseur de fréquence au niveau de la vitesse et permettent ainsi la part hautement dispersive du transport de produit à mélanger telle que requise pour les bétons haute performance. Avec la possibilité d'adaptation continue aux exigences du béton haute performance à réaliser, de la puissance et du régime des deux moteurs pour l'arbre de mélange interne et le racleur externe, on obtient des durées de mélange nettement réduites avec dans le même temps des valeurs nettement plus élevées d'étalement et d'affaissement.

Une autre optimisation du processus de mélange est obtenue via l'ajout par étapes des différents composants du mélange. Si les constituants farineux (le cas échéant aussi la fraction de sable) sont ajoutés dans une première étape avec l'eau de gâchage et les superfluidifiants puis mélangés à fond moyennant une vitesse d'outil de 6 - 8 m/s, on obtient une dissolution optimale de la suspension. Dans une seconde étape, on ajoute les fractions de granulats grossiers qui sont mélangés moyennant une vitesse d'arbre de mélange interne nettement plus faible. Ce procédé à deux étapes nécessite moins de puissance d'entraînement que le processus de mélange dans lequel tous les composants solides sont tout d'abord homogénéisés à sec puis mélangés à fond avec les composants liquides.

Une autre application intéressante du mélangeur conique de type Kniele est le mélange en douceur de granulats légers dans les constituants farineux préalablement mélangés avec l'eau de gâchage / les additifs pour béton, car l'outil de mélange interne ne peut pas détruire le granulat de par le grand écart par rapport aux parois de la cuve. Jusqu'à 10 % des granulats légers peuvent être détruits lors du processus de mélange dans les systèmes de mélange standard, selon des analyses de Thienel [4]. Pour pouvoir démontrer les possibilités de réalisation de bétons haute performance avec des mélangeurs standard, un malaxeur à deux arbres à palettes de type BHS a été acquis. Les malaxeurs à deux arbres à palettes disposent de deux parts de marché de plus de 50 %, ils peu-

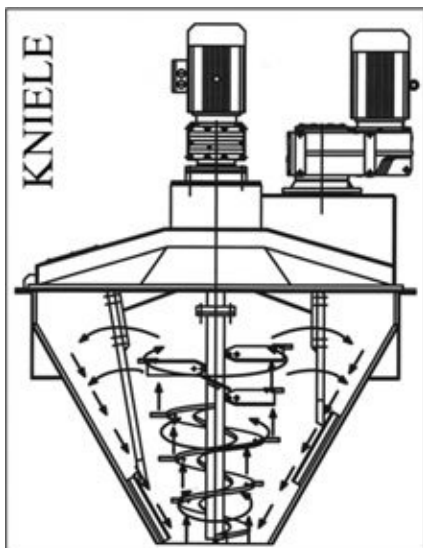


Fig. 2: principe de mélange du mélangeur conique de type Kniele



Malaxeur à deux arbres à palettes
Vitesse d'outil élevée

Fig. 3: vitesse d'outil élevée, malaxeur à deux arbres à palettes

vent être considérés comme composants standard dans la réalisation de béton prêt à l'emploi. Même si les autres mélangeurs mis en œuvre dans la fabrication de béton, comme p.ex. les mélangeurs planétaires, se distinguent des malaxeurs à deux arbres à palettes par leur guidage du produit à mélanger, les résultats des analyses décrits ci-dessous devraient pouvoir être transposés à tous les mélangeurs standard. En principe, pour la réalisation de bétons haute performance, un processus de mélange à deux étapes est recommandé, la première étape de mélange voyant la dissolution dispersive des composants à grain fin et liquides. La seconde étape de mélange ne contient plus que le processus convectif dans lequel la suspension déjà dissolue et homogénéisée de manière optimale est mêlée à fond avec les fractions de granulats plus grossiers.

Si un malaxeur à deux arbres à palettes doit être utilisé pour la réalisation d'un béton haute performance, il faut allonger considérablement le temps de mélange de 30 secondes usuel pour la réalisation de bétons normaux.

Si la vitesse d'outil est trop fortement augmentée, ceci entraîne en général une qualité de mélange nettement moindre vu que le produit à mélanger est uniquement projeté vers le haut par les mouvements plus rapides de l'outil mélangeur (fig. 3). Une circulation contrôlée du produit à travers le mélangeur ne peut pas avoir lieu dans ces conditions.

Si on choisit le processus de mélange en deux étapes décrit précédemment et dans lequel les (ultra) fines sont dissolues de manière optimale dans les composants liquides d'eau de gâchage et de superfluidifiant par un système de mélange colloïdal, puis la suspension ainsi obtenue est ensuite mêlée aux fractions de granulats grossiers dans un mélangeur standard, on peut réali-

ser sans problème des bétons haute performance avec des mélangeurs standard adaptés et équipés en conséquence. Les frais d'investissement relativement modérés pour un système de mélange colloïdal adapté à la taille du mélangeur standard permettent une modernisation économique des installations de mélange standard, donnant du coup aux exploitants la possibilité de proposer tous les bétons sur le marché.

Outre la grande qualité de mélange et l'homogénéité des bétons frais, il est également possible de produire de manière ciblée des bétons haute performance élaborés, en grandes quantités et dans des temps de mélange relativement courts.

Les principaux éléments de la production de béton en deux étapes sélectionnée par le WIB sont :

- 1) réalisation de la suspension contenant les (ultra) fines dans un système de mélange colloïdal
- 2) ajout de la suspension dans l'installation de mélange standard
- 3) bref mélange convectif de la suspension et du granulat dans l'installation de mélange standard

Il est ainsi possible de produire des bétons haute performance en utilisant les mêmes cycles de temps d'alimentation du mélangeur sans pour autant réduire les quantités de production connues des bétons normaux. Ce procédé poursuit une séparation conséquente des mouvements de mélange dispersifs et convectifs, indispensable pour la réalisation ciblée de bétons haute performance à haute qualité de mélange. La séparation des processus de transport dispersif et convectif permet en outre des économies

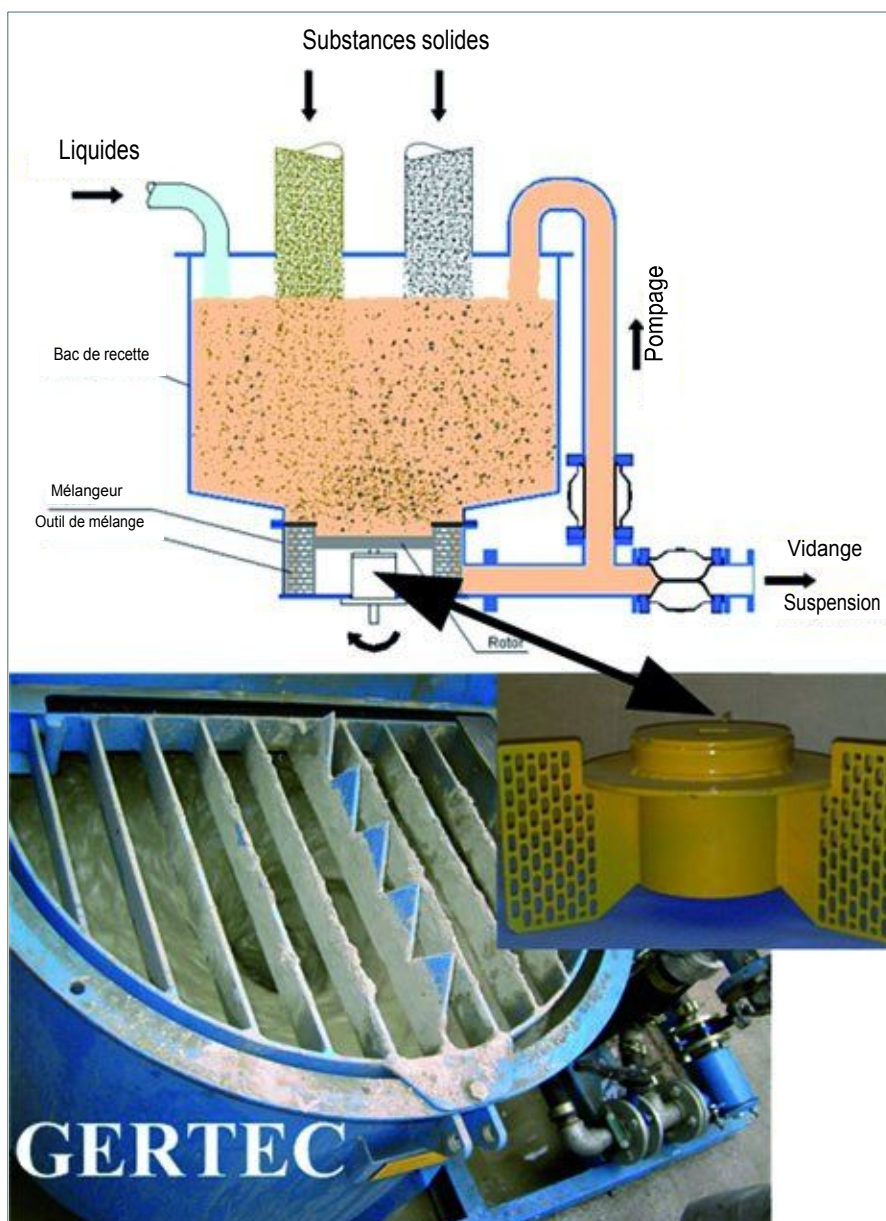


Fig. 4: mélangeur colloïdal

considérables en ce qui concerne l'énergie électrique requise pour le processus complet de mélange. Ainsi lorsqu'un système de mélange standard est exploité seul, une grande partie de l'énergie est alimentée uniquement pour la partie beaucoup trop importante de mouvement convectif de mélange sans que l'on puisse garantir la dissolution optimale des composants fins ni la répartition homogène des composants liquides sur la surface des particules. Alors que les mélangeurs standard fonctionnent avec des vitesses d'outil d'env. 1,5 m/s, des vitesses sporadiques d'env. 6–8 m/s sont considérées comme optimales ([5] et [6]) dans des systèmes de mélange intensif. Par contre, avec des systèmes de mélangeur colloïdal (fig. 4), les outils de mélange aménagés directement sur l'arbre moteur sont exploités à des vitesses d'outil entre 15 m/s et 25 m/s. L'humidification des particules solides fines avec l'eau et tous les additifs pour béton ajoutés, ainsi que la dissolution mécanique de tous les agglomérats sont garanties avec ce processus de mélange dispersif, résultant dans des mélanges colloïdaux dispersés, stables à la sédimentation et qui peuvent être ajoutés directement sous forme de suspension stable au mélangeur

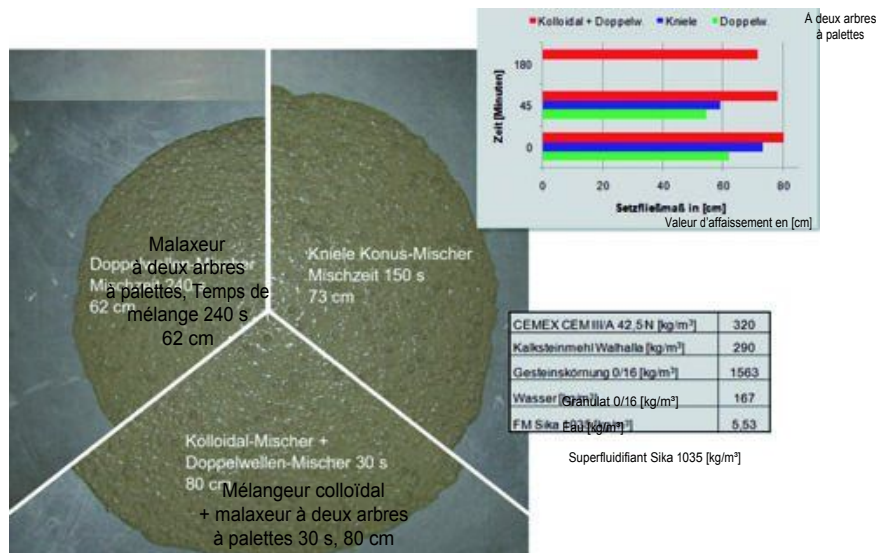


Fig. 5: BAC avec différentes techniques de mélange

standard en vue de la réalisation de bétons haute performance. Si des quantités plus importantes de béton doivent être produites, les suspensions réalisées à l'aide de systèmes de mélange colloïdaux peuvent aussi être stockées en grandes quantités, de manière à garantir le cas échéant un débit de pro-

duction homogène de l'installation de mélange standard avec des cycles élevés. Pour illustrer les effets de la technologie de mélange en deux étapes sur les propriétés de béton frais, on a réalisé un BAC de type farineux selon Okamura avec les processus de mélange ci-dessous :

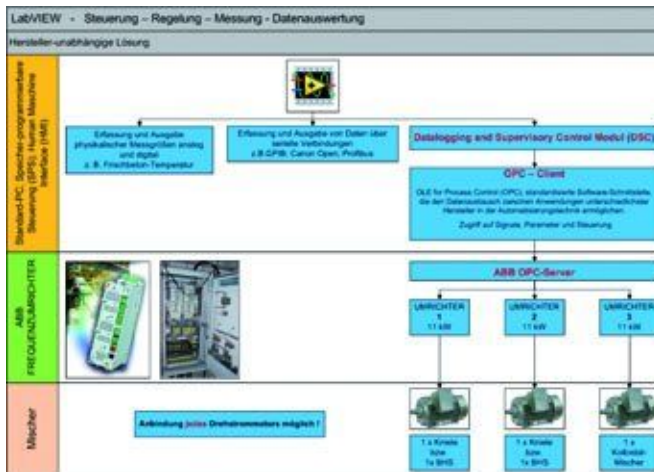


Fig. 6: commande d'installation

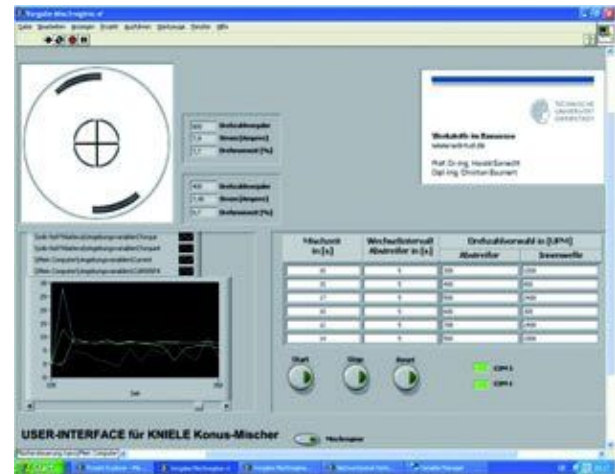


Fig. 7: régime de mélange avec mélangeur conique

- 1) utilisation exclusive d'un malaxeur à deux arbres à palettes
- 2) utilisation exclusive d'un mélangeur conique de type Kniele
- 3) réalisation en deux étapes combinant un mélangeur colloïdal et un malaxeur à deux arbres à palettes

Les résultats donnés à la fig. 5 démontrent que plus la part dispersive des mouvements de mélange augmente, plus la valeur d'affaissement du BAC augmente. En outre, la dissolution colloïdale des constituants farineux via le système de mélange colloïdal permet de maintenir le plus longtemps l'ouvrabilité du BAC.

Régime de mélange

Dans la conception technique du système de laboratoire représenté sur la figure 1, on a veillé dans une large mesure à ce que les problèmes survenant dans la pratique et dans le cadre de la recherche et développement puissent être analysés sans restrictions. Par exemple, pour pouvoir simuler le transport du béton dans des camions malaxeurs, il est absolument nécessaire d'exploiter les systèmes de mélange à vitesse d'outil très basse. Cependant, le refroidissement propre des moteurs triphasés ne suffit pas pour éviter les dommages au moteur dus à un fonctionnement constant en dessous de 20 Hz. C'est pourquoi on a fait appel à des moteurs de puissance accrue et à ventilation forcée, avec des convertisseurs de fréquence de la toute dernière génération et des plages de régime étendues.

Les convertisseurs de fréquence des moteurs d'entraînement des trois systèmes de mélange utilisés dans le laboratoire sont raccordés à un ordinateur par le biais d'une interface réalisée au WIB ; il a ainsi été possible entre temps de développer des

solutions de logiciel qui permettent non seulement de saisir de manière optimale les processus de mélange de bétons normaux et de bétons haute performance, mais également de les contrôler, cela avec des interfaces utilisateur conviviales. Ainsi, les régimes de mélange des différents bétons peuvent être optimisés à un point tel que la puissance d'entraînement et le régime nécessaires à l'exécution des tâches de mélange puissent être adaptés au type et à la vitesse de dosage des composants de la recette à ajouter. Une telle procédure permet non seulement d'obtenir des qualités optimales de mélange, mais également une durée de mélange aussi courte que possible.

Le logiciel LabVIEW est utilisé pour la surveillance et le contrôle assistés par ordinateur des processus de mélange, il permet l'intégration directe des convertisseurs de fréquence sans autre matériel, via l'interface logicielle OPC (= OLE for Process Control). En conséquence et grâce à ce système ouvert, on peut exploiter tous les moteurs triphasés quelle que soit la marque et consulter leurs données de moteur (fig. 6). Selon [7], le processus de mélange lui-même se divise en plusieurs phases. Dans le cas de mélanges très riches en fines, on commence généralement avec une phase de mélange à sec et la plus grande partie du travail de mélange est réalisée en peu de temps avec un apport minimum d'énergie. Ensuite, l'ajout d'eau entraîne la formation de ponts liquides entre les particules qui agissent comme des forces adhésives. Ces forces adhésives doivent être surmontées par les outils de mélange afin d'obtenir une homogénéisation uniforme. Pour ce faire, les moteurs doivent tourner à un couple plus élevé que pour la phase de mélange à sec. Avec l'ajout des superfluidifiants et à mesure qu'ils agissent, la puissance requise par les moteurs d'entraînement diminue au

cours du processus de mélange. Dès que le couple des moteurs atteint son minimum, le mélange est dissous de manière optimale – selon la technique de mélange mise en œuvre. Un allongement de la durée de mélange n'entraîne aucune amélioration des propriétés du béton frais. Au contraire, l'abrasion des particules générée par la poursuite du processus de mélange a pour effet d'augmenter la surface des particules, l'abrasion ainsi accrue des particules entraîne un réchauffement de la température du mélange puis une détérioration des propriétés de béton frais.

La durée des différentes phases de mélange et la vitesse des outils peuvent être déterminées librement via les interfaces utilisateur créées avec LabVIEW. Toutes les données importantes du point de vue de l'utilisateur peuvent être saisies, directement évaluées et visualisées. En outre, toutes les données peuvent être documentées. Dans le cadre des travaux actuels de recherche, des logiciels sont développés au WIB pour pouvoir déterminer automatiquement à partir de l'ordinateur pilote les adaptations de la puissance et du régime des moteurs d'entraînement des outils de mélange, cela par le biais d'une évaluation de l'évolution du processus de mélange. En outre, la durée des différentes phases de mélange peut être adaptée individuellement à l'évolution du processus de mélange.

Il est ainsi possible d'optimiser les étapes de mélange même lors de la réalisation des recettes les plus difficiles. Si la suspension du BAC décrite ci-dessus est réalisée dans un mélangeur colloïdal à vitesse d'outil constante (fig. 8) de 15 m/s, on constate des grandes différences en ce qui concerne la puissance requise des moteurs d'entraînement selon que l'on ajoute manuellement du ciment ou de la farine calcaire, bien que

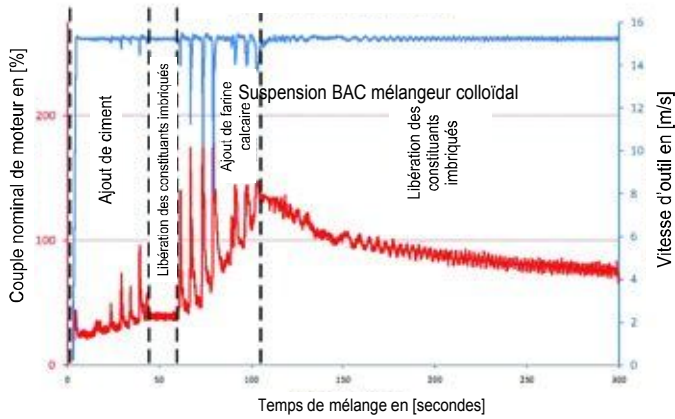


Fig. 8: mélangeur colloïdal à régime constant

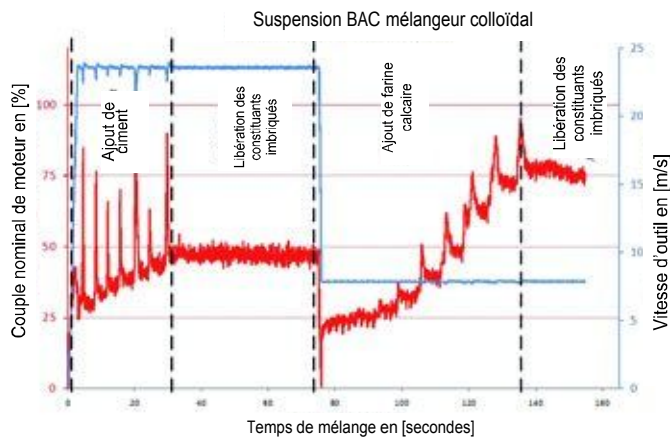


Fig. 9: mélangeur colloïdal à 2 vitesses

ces deux produits présentent des valeurs Blaine similaires. Ainsi, le couple moteur se situait toujours en deçà de 100 % lors de l'ajout du ciment. Avec l'ajout de la farine calcaire, on observe immédiatement une surcharge de l'entraînement. Au vu de ces observations, on a sélectionné dans la première phase une vitesse d'outil accrue (25 m/s) pendant laquelle le ciment est ajouté (fig. 9).

Grâce à la vitesse d'outil accrue, la charge du moteur pouvait être considérablement augmentée afin de garantir une efficacité aussi forte que possible lors de la première phase de mélange. Dans la seconde phase de mélange au cours de laquelle on ajoute la farine calcaire à la suspension de ciment, on poursuit tout d'abord avec une nette diminution de la vitesse (8 m/s).

En conséquence, l'ajout de farine calcaire pouvait être réalisé de manière optimale sans surcharge de l'entraînement. La diminution de la vitesse d'outil entraîne en outre un réchauffement moins fort de 2 Kelvin de la suspension, ce qui permet d'atteindre une valeur d'affaissement plus élevée. On travaille actuellement à un système d'ajout automatique des matériaux de base avec pour objectif une réduction de la durée du processus de mélange, une diminution de l'énergie requise et une optimisation des propriétés de la suspension. On atteint un processus de mélange efficace lorsque le couple moteur peut être maintenu si possible en permanence à presque 100% du couple nominal du moteur.

Pour ce faire, on contrôle la vitesse de l'ajout continu de farine calcaire dans la cuve de mélange ainsi que le couple moteur en fonction du type de farine calcaire.

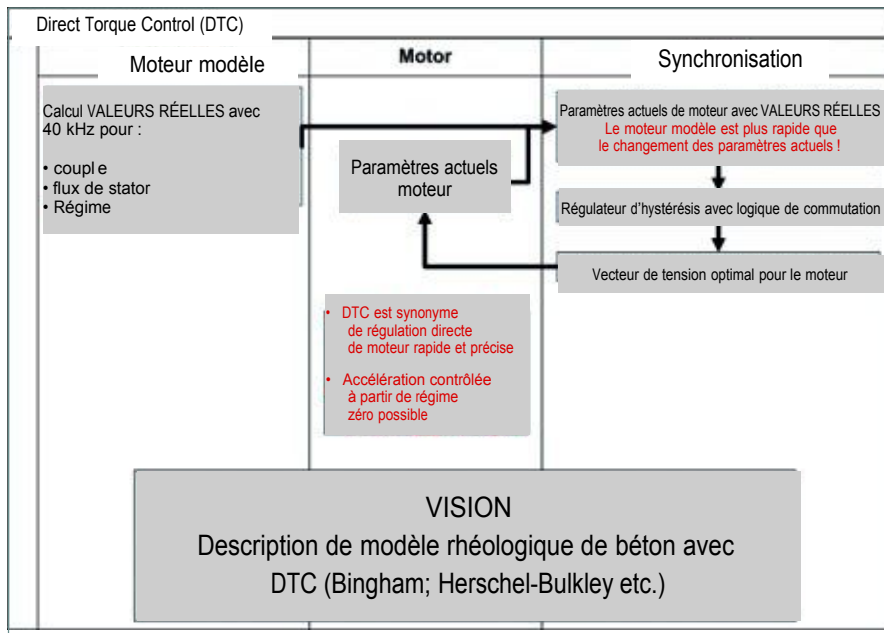


Fig. 10: convertisseur de fréquence à commande directe de couple DTC

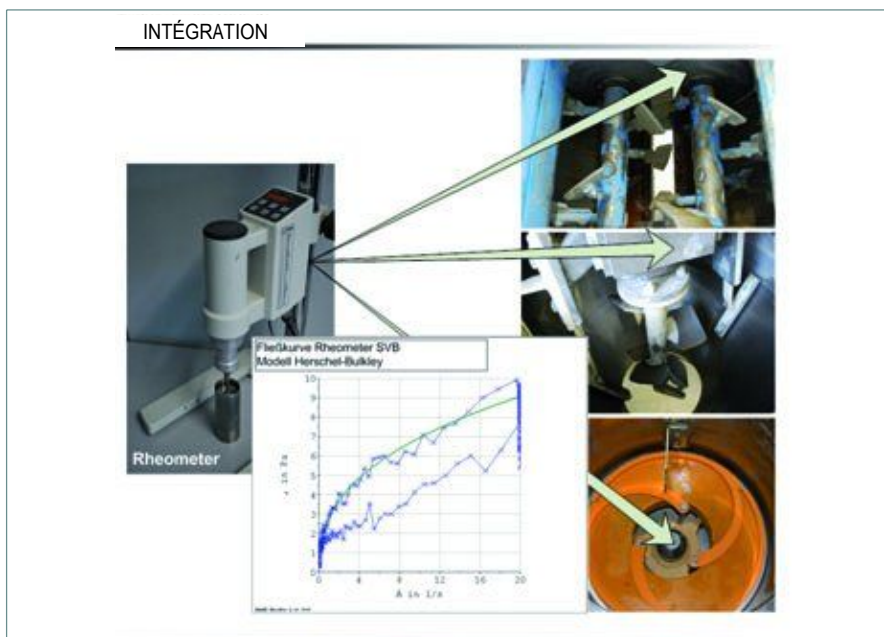


Fig. 11: intégration d'un rhéomètre dans le mélangeur

Paramètres rhéologiques

La saisie de la puissance d'entraînement lors du processus de mélange permet selon [5], [6] et [7], de déterminer le moment optimal de la fin du mélange. La puissance d'entraînement diminue de façon asymptotique pendant le processus de mélange et indique l'homogénéisation optimale des matériaux de base ainsi que la répartition homogène de l'eau et des superfluidifiants, avec la technique de mélange mise en œuvre. Avec les technologies de mélange disponibles au WIB, l'évaluation des données du moteur relevées au cours du mélange et relatives à la puissance absorbée et

au régime, permet de poursuivre le développement de commandes de processus de mélange qui à leur tour permettent de déterminer et contrôler de manière active et auto-régulatrice les vitesses d'outil des différentes phases de mélange, le dosage optimal des matériaux liquides et solides à ajouter, ainsi que la fin aussi rapide que possible de la phase de mélange.

Cette méthode permet surtout de pallier aux nombreuses variations dans la composition et la granulométrie des matériaux de base. La saisie, l'évaluation et l'adaptation extrêmement sensibles du couple moteur et du régime permettent de réagir de manière

extrêmement sensible à des variations de ce type. Il en va de même pour la problématique et la prise en compte de l'humidité dans le granulat qui exerce une grande influence sur les propriétés du béton frais, justement dans le cadre de la réalisation de bétons haute performance. Les nombreuses impondérabilités bien connues liées à l'acquisition constante de l'humidité des matériaux, leur influence sur le processus de mélange et la qualité du mélange et les variations de composition et de granulométrie du ciment et autres (ultra) fines, la qualité changeante de la surface et la granulométrie des sables sont, comme décrit dans la littérature - p.ex. [8] -, difficiles à acquérir et du coup à prendre en compte dans la détermination de la composition des mélanges. L'utilisation croissante de substituts pour le ciment et la mise en œuvre de nouveaux additifs hautement efficaces pour le béton ajoute une difficulté à toute garantie de qualité uniforme de mélange pour les bétons haute performance.

En conséquence, la qualité de mélange et les propriétés de béton frais des bétons haute performance ne peuvent jusqu'à présent être évaluées qu'après la fin du mélange, via les contrôles classiques de béton frais. Il était possible en alternative d'analyser et évaluer les propriétés rhéologiques du mélange de béton lors du processus de mélange. Normalement, le comportement rhéologique d'un mélange est caractérisé à l'aide d'un rhéomètre. Pour ce faire, un instrument de mesure est accéléré dans un échantillon de béton, de l'arrêt jusqu'à un régime défini et on enregistre le couple. Il fallait pour ce faire un réglage de vitesse très précis ainsi qu'une saisie efficace et suffisamment précise du couple. Si le système de mélange doit être utilisé lui-même comme rhéomètre, les convertisseurs de fréquence usuels à commande vectorielle – ils représentent l'état actuel de la technique pour la régulation en continu du régime des moteurs triphasés – ne permettent qu'une mise en œuvre restreinte. Cela s'avère ici désavantageux d'exiger lors du fonctionnement une vitesse minimum d'env. 2 - 3 Hz pour garantir la haute précision requise des capteurs rotatifs au sein des moteurs triphasés. C'est ainsi que lors de l'assemblage des systèmes de mélange en laboratoire au WIB, on a utilisé la dernière génération de convertisseurs de fréquence de la société ABB, ils fonctionnent avec commande directe du couple (DTC = Direct Torque Control) et atteignent, même sans capteur rotatif, la précision des systèmes à régulation vectorielle. Ces derniers exigeant en outre du matériel supplémentaire. Outre la commande directe du couple, la toute dernière

technologie de convertisseurs de fréquence ABB permet de procéder à un démarrage contrôlé des moteurs d'entraînement à partir du ralenti (0 Hz). Pour ce faire, le procédé DTC (fig. 10) fonctionne selon un modèle de moteur qui calcule toutes les 0,025 ms les principaux paramètres comme le régime, le couple et le flux de stator et les compare avec les données moteur effectivement mesurées. Comme le moteur modèle peut calculer les valeurs escomptées plus vite que ce qu'il ne faut pour modifier les données moteurs effectives, on obtient une précision de réglage exceptionnelle.

Si les outils de mélange sont accélérés à partir de l'arrêt et les données d'entraînement extrêmement précises saisies, on peut, avec des solutions logicielles de LabVIEW, non seulement saisir les valeurs de mesure, mais également procéder à des évaluations de modèles rhéologiques selon Bingham, Herschel-Bulkley etc. (fig. 11). Si les propriétés de béton frais satisfont aux exigences, ce modèle rhéologique peut servir de référence. Toute charge peut ainsi être contrôlée quant à ses caractéristiques rhéologiques sans intervenir sur les cycles de production. Si la limite élastique d'un BAC est trop élevée par rapport à la référence, il est possible d'apporter des corrections par le biais d'une quantité appropriée de superfluidifiant. Si par contre la viscosité est trop faible, les agents modificateurs de la viscosité permettent une intervention ciblée.

En conclusion, il est possible de fabriquer efficacement et à échelle industrielle même les bétons haute performance les plus difficiles à manipuler, avec les équipements et compléments aux systèmes de mélange présentés. Il ne s'agit pas uniquement ici d'atteindre de manière ciblée la qualité de mélange des systèmes de mélange connus, mais d'obtenir une meilleure qualité encore plus rapidement. En outre, les systèmes de mélange techniquement adaptés sont nettement moins sensibles aux variations de fabrication des matériaux de base.

■ Bibliographie

- [1] Stieß, M.: *Mechanische Verfahrenstechnik 1*, Zweite Auflage. Berlin : Springer Verlag, 1995.
- [2] Beitzel, H.: Einfluss der Mischdauer auf die Betonmischgüte. BMT, Heft 2, s.1., Bd. 27, 1980, Seite 77-83.
- [3] Beitzel, H.: Gesetzmäßigkeiten zur Optimierung von Betonmischern; Teil 1 und Teil 2. Heft 11 und Heft 12, s.l. : BMT, 1981, Bde. 28; Seiten 586-602 und Seite 641-647.
- [4] Thienel, K. Chr. *Werkstoffe des Bauwesens Leichtbeton*. s.l. : Universität der Bundeswehr, 2006.
- [5] Orgass, M.; Dehn, F.: Einfluss der Mischtechnologie bei Hochleistungsbetonen. BFT, 1/2006, s.l., 2006.
- [6] Schießl, P.; Lowke, D.; Pötz, M.: Optimierung des Mischablaufs für selbstverdichtende Betone. Beton, 12/2005, s.l., 2005.
- [7] Schmandra, A.: Mischen von Sonderbetonen. BFT, 12/2005, s.l., 2005.
- [8] Kirpach, C.; Waldmann, D.; Greger, M.: Untersuchung des Einflusses von Sanden auf den Wasser- und Fließmittelanspruch von selbstverdichtenden Mörteln. Beton, 6/2008, s.l., 2008.