



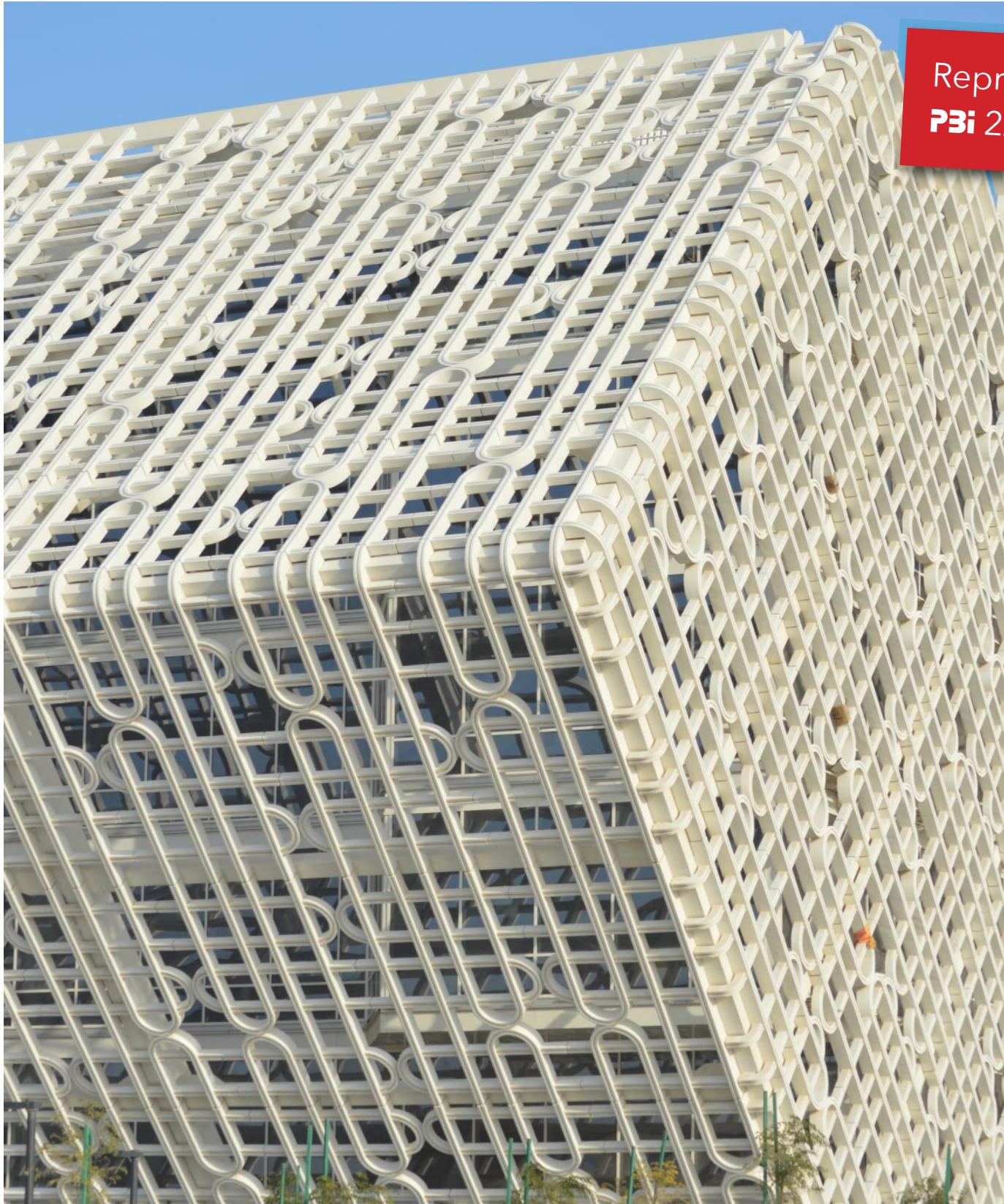
Préfa Béton International  
Édition française

FR 2 | 2020

www.cpi-worldwide.com

REPRINT | TECHNOLOGIE DU BÉTON

Confusions linguistiques babyloniennes  
et quelques solutions pratiques



Reprint  
**PBI 2/2020**



# Confusions linguistiques babyloniennes et quelques solutions pratiques

■ Thomas Deuse, Stefan Hainer, Frank Parker, Thomas Sievert, Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden, Allemagne

«Les théologiens interprètent la construction de la tour de Babel comme une tentative des hommes d'être l'égal de Dieu. Afin de les punir de leur arrogance, Dieu décide de mettre fin, sans effusion de sang, à la construction de la tour: il provoque une confusion des langues qui fait que les hommes, ne se comprenant plus et incapables de communiquer entre eux, sont forcés d'abandonner leur projet [1].» Les différentes désignations données aux bétons à hautes performances rappellent quelque peu ce projet de construction mythique, même si dans le cas des bétons, il est tout de même permis d'espérer une fin meilleure. En attendant, bien que l'idée d'une Europe unie soit censée tout simplifier, il existe une multitude d'appellations pour désigner une matrice compacte composée de ciment et de diverses additions (pouzzolaniques) et farines, avec ou sans fibres ...

Après une brève introduction rappelant quelques principes inhérents aux bétons hautes performances, cet article décrit le potentiel d'innovation offert en ce domaine par les avancées technologiques en termes de conception de ciments. Celles-ci s'appuient sur l'expérience acquise lors du développement de nombreuses applications de bétons à hautes (BHP) et à ultra-hautes performances (BUHP) au cours des années passées. Sont par ailleurs évoquées de manière

succincte les implications inhérentes à l'approche normative allemande, transposée dans la directive BUHP de la Commission allemande pour le béton armé (DAFStb) en cours de publication. Les auteurs s'attachent à démontrer la possibilité de produire des bétons à hautes et ultra-hautes performances à l'aide d'équipements de fabrication usuels en ne recourant exclusivement qu'à des ciments normalisés et des agrégats courants. Cette proposition constitue une alternative particulièrement intéressante, offrant entre autres des avantages économiques et écologiques évidents par rapport aux formulations classiques recourant à diverses additions telles que la fumée de silice.

Au niveau international, les dénominations suivantes sont utilisées pour désigner les bétons hautes à ultra-hautes performances (liste non exhaustive):

- UHPC «Ultra high performance concrete» (Béton à Ultra-Hautes Performances)
- UHSC «Ultra high strength concrete» (Béton à Ultra-Haute Résistance)
- UHPFRC «Ultra high performance fiber reinforced concrete» (Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances)
- DFRCC «Ductile fiber reinforced cementitious composite» (Composite cimentaire ductile renforcé de fibres)
- SHCC «Strain hardening cementitious composite» (Composite cimentaire à haute ductilité par écrouissage)

Tableau 1: Matériaux à hautes performances de DYCKERHOFF

Produit Dyckerhoff	Type			Composition						Système	
	Ciment conforme à l'EN 197-1	Composé pour liant	Béton à hautes performances	Ciment gris	Ciment blanc	Fillers minéraux	Granulats	Fibres d'acier	Eau + adjuvants	Technologie Mikrodur	Technologie NanoDur
Variodur 30	x			x						x	
Variodur 40	x			x						x	
Variodur 50	x			x						x	
Flowstone grey		x		x		x				x	
Flowstone white		x			x	x				x	
Nanodur Compound 5941 grey		x		x		x				x	x
Nanodur Compound 5941 grey		x			x	x				x	x
Xposal 105			x	x			x	x	x	x	

- ECC «Engineered cementitious composite» (Composite cimentaire à performances définies)
- UHP-HFRC «Ultra high performance hybrid fibre reinforced concrete» (Béton fibré hybride à ultra-hautes performances)
- HPFRCC «High performance fiber reinforced cementitious composites» (Composites cimentaires fibrés à hautes performances)
- RPC «Reactive powder concrete» (Béton de Poudres Réactives)
- UHFB «Ultra hochfester Beton» (Béton à Ultra-Haute Résistance / Allemagne)
- UHFB «Ultra-Hochleistungs-Faserbeton» (Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances / Suisse)
- UHLB «Ultra Hochleistungsbeton» (Béton à Ultra-Hautes Performances / Allemagne)
- BFUP «Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances» (France)
- BPR «Béton de Poudres Réactives» (France) [2]

En Allemagne, il est particulièrement difficile de faire la distinction entre les dénominations anglaise 'Ultra High Performance Concrete' (UHPC) et allemande 'Ultra-Hochfester Beton' (UHFB). Le site allemand [www.beton.wiki](http://www.beton.wiki), en précise la définition: «L'appellation 'béton à hautes performances' indique que pour de nombreuses applications, les critères de durabilité sont prioritaires ou du moins tout aussi importants que la résistance. Le béton à haute résistance et le béton à hautes performances ne diffèrent généralement pas du point de vue de la technologie du béton.» [3].

## Béton à hautes performances

### Compacité matricielle et hydratation du ciment

De manière générale et simplifiée, les bétons à hautes performances classiques sont constitués de ciments normalisés (à faible teneur en C3A pour la plupart) additionnés de fumée de silice, de granulats à granulométrie échelonnée et éventuellement de microfibres d'acier. En raison de la réaction pouzzolanique entre la fumée de silice et l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment, de la pâte de ciment supplémentaire se forme, ce qui renforce la cohésion des particules et la compacité de la microstructure. Comme tout cela résulte de l'interaction de matériaux ultrafins, la matrice cimentaire est considérablement plus compacte que celle du béton normal, ce qui engendre un matériau plus résistant et plus durable. Le principe de la compacité granulaire (ou de l'empilement granulaire) fait depuis de nombreuses années l'objet de recherches et de tentatives d'amélioration dans les universités et centres de recherche du monde entier. Ceci va de l'optimisation du mélange granulaire à l'état sec, en passant par l'ajout de fibres et d'additions les plus diverses, jusqu'à l'accélération de la prise du ciment par traitement thermique. Cela a donné naissance à des modèles extrêmement complexes que même les utilisateurs avertis ont des difficultés à interpréter. Certes, la plupart de ces considérations sont correctes sur le principe, mais l'hydratation du ciment est un processus dynamique et l'addition d'eau fait que l'empilement optimal des particules tel que considéré dans un

mélange granulaire sec est considérablement modifié en un très court laps de temps par la croissance des différentes phases d'hydratation du clinker. Après une période dite «dormante», des cristaux en forme de bâtons ou de barrettes formés pendant la première phase d'hydratation se transforment en une matrice composée de faisceaux de fibres de C-S-H resp. de feuillets de C-S-H, de plaquettes d'hydroxyde de calcium et de cristaux d'ettringite croissant dans le sens longitudinal [4]. De plus, combinées au ciment, les additions fines telles la fumée de silice, les cendres volantes, les farines de laitier de haut fourneau et de calcaire, engendrent également des modifications importantes dans la matrice pendant les premières phases d'hydratation [5].

En bref, la structure de la matrice cimentaire est influencée par les facteurs les plus divers et une compacité granulaire apparente optimisée à l'état sec ne signifie pas nécessairement qu'elle sera optimale pour le développement des structures cristallines formées par l'hydratation du ciment, en conjonction avec les adjuvants et les additions fines.

### Rapport eau/ciment et fluidifiant PCE

Un élément de construction à (ultra) hautes performances signifie que celui-ci présente des performances mécaniques et une durabilité exceptionnelles. En dehors de la compacité granulaire, le paramètre le plus important est bien entendu le rapport eau/ciment, qui doit être maintenu le plus faible possible par le recours à des fluidifiants appropriés de type PCE. Il est également essentiel de déterminer les paramètres rhéologiques du béton, c.-à-d. le comportement à l'écoulement requis à la mise en œuvre. Alors que les bétons auto-compactants utilisés en préfabrication auront de préférence un comportement à l'écoulement rhéo-épaississant («dilatance»), celui des bétons de chantier vibrés devra plutôt être du type rhéofluidifiant (pseudo-plasticité) afin de faciliter sa mise en place. Les propriétés rhéologiques, et par conséquent l'ouvrabilité, sont des aspects essentiels des bétons à (ultra) hautes performances.

### Production

Le BUHP fait l'objet de recherches depuis plus de vingt ans. Il n'est pourtant que rarement tenu compte des équipements usuellement disponibles dans l'industrie du béton pour transposer en pratique sa production. En règle générale, si les mélanges prêts à l'emploi couramment utilisés ne nécessitent que peu de capacités supplémentaires en termes de silos et de trémies de dosage, leur mise en œuvre impliquent néanmoins le recours à des malaxeurs hautes performances. Quelques entreprises spécialisées se sont équipées en conséquence. Aucune tendance au développement plus large de production de BHP/BUHP à base de ciment Portland et d'additions pouzzolaniques fines n'est cependant observée.

De nouvelles générations de bétons hautes performances, dont le développement s'appuie sur l'évolution des procédés technologiques de production de ciment, ont pourtant vu le jour au cours des 15 dernières années. Les ciments et liants issus de ces évolutions sont repris dans le Tableau 1. Des exemples d'applications pratiques sont présentés par la suite.

Exemples d'application de Flowstone

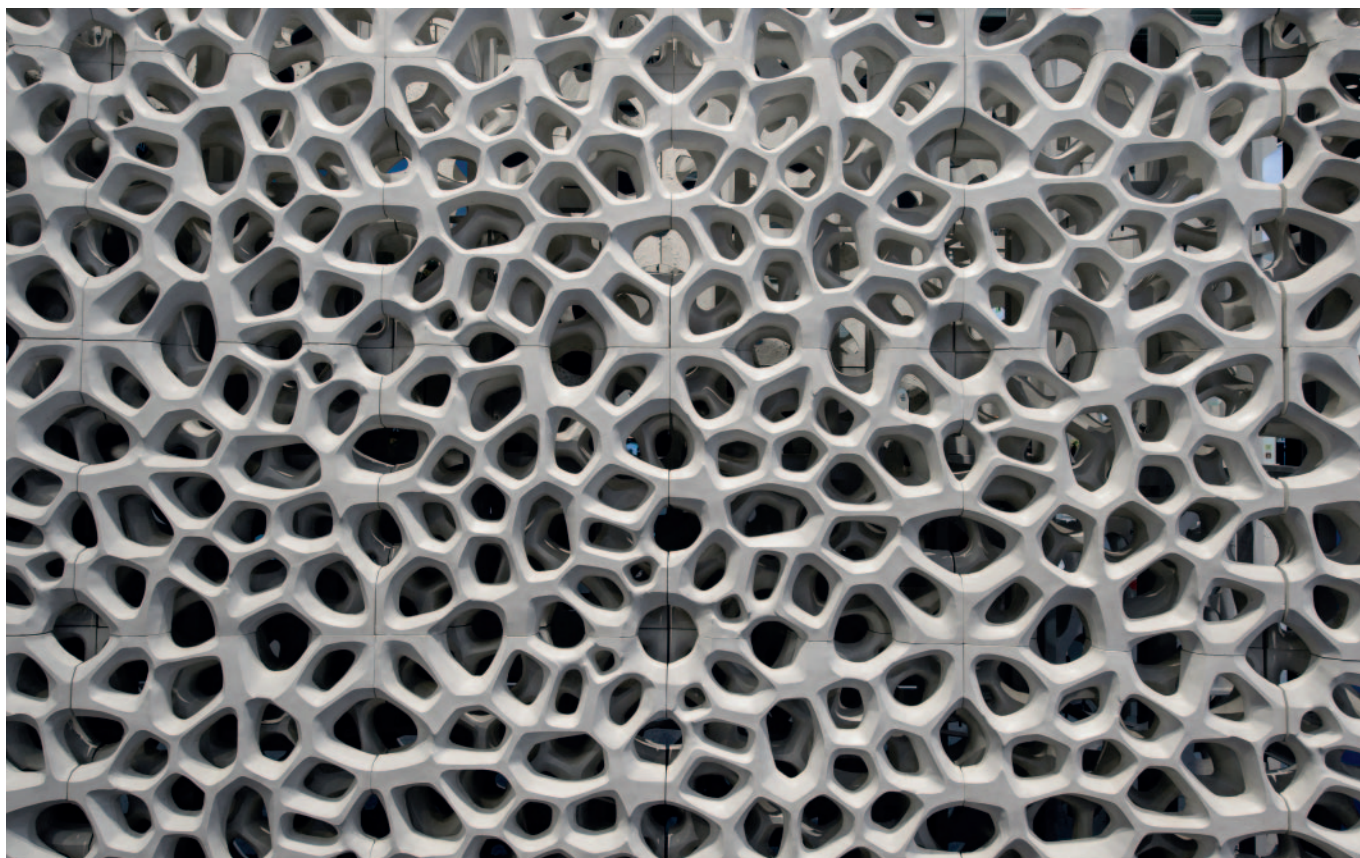


Fig. 1: Mur à structure alvéolaire (Francfort)



Fig. 2: Station de métro de la ligne Wehrhahn à Düsseldorf (photo: Joerg Hempel)

## Liants hydrauliques prémélangés pour bétons autocompactants

### FLOWSTONE® pour BHP destiné à la préfabrication

Au-delà des performances techniques, l'industrie du béton manufacturé recherche des formulations de bétons robustes. Flowstone est le fruit d'un travail de développement précurseur de Dyckerhoff. Basé sur la technologie MIKRODUR®, il se présente sous forme d'un liant prémélangé destiné à la confection de bétons à hautes performances. Il est constitué de fractions de ciment normalisé et de ciment ultrafin ainsi que d'additions de fines issues de sable de quartz. Le fuseau granulométrique de l'ensemble a été optimisé. Ce liant est employé avec succès depuis plusieurs années pour la confection d'éléments décoratifs et architectoniques en béton hautes performances. Il s'adapte aux différentes applications moyennant un ajustement des dosages en adjuvants et le recours à différents granulats et pigments. Avec des rapports e/c nettement inférieurs à 0,4, il est possible de formuler des bétons durables offrant des résistances à la compression > 100 MPa et des résistances à la traction par flexion allant jusqu'à 15 MPa. De fait, ces dernières sont déterminantes pour le dimensionnement d'éléments élancés ou de faible épaisseur, comme les panneaux de façades, qui sont plus sollicités en flexion qu'en compression. Depuis son lancement sur le marché il y a plus de 15 ans, le prémix Flowstone s'est imposé pour les applications suivantes :

- Dalles et panneaux en béton de qualité supérieure pour une utilisation en intérieur et en extérieur

- Dalles de grand format et marches d'escaliers angulaires
- Produits en béton à haute résistance au gel-dégel avec agents de déverglaçage
- Façades en pierre reconstituée non armée
- Mobilier en béton pour usage en intérieur et en extérieur
- Couvertines, colonnes, balustrades et appuis de fenêtre
- Éléments spéciaux, architecturaux ou de décoration

### NANODUR® pour BUHP destiné à la préfabrication et au béton prêt à l'emploi

Le Nanodur Compound 5941 est un liant prémélangé constitué de 59% de fractions de ciment normalisé et de ciment ultrafin, activées par l'addition de silice synthétique, et de 41% de sable de quartz fin. Des formulations de base robustes et très simples comprenant soit du sable 0/2 mm séché à l'air et des gravillons 2/5 mm ou uniquement du sable 0/2 mm, permettent de produire des BUHP dans des malaxeurs usuels. Avec des granulats spéciaux, il est possible d'atteindre un module d'élasticité de 80 000 MPa, ce qui correspond à celui de l'aluminium. En plus de fluidifiants appropriés à base de PCE, il est recommandé d'utiliser un réducteur de retrait dosé à environ 8 l/m<sup>3</sup> afin de minimiser les contraintes pendant le durcissement et les déformations de l'élément fini.

#### Nanodur pour bancs et bâtis de machines-outils (en préfabrication)

La fabrication de bancs et de bâtis de machines-outils constitue actuellement l'un des principaux domaines d'application du BUHP en Europe et en Chine [6].

Tableau 2: Formulations standardisées à base de Nanodur

Exemples de compositions		Particules grossières E80	Particules grossières E45	Particules fines
Nanodur Compound 5941 gris	[kg/m <sup>3</sup> ]	1.050	1.050	1.050
Sable 0/2 mm (séché à l'air)	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	430	1.150
Gravillons 2/5 mm (séchés à l'air)	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	880	-
Durigid 1/3 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	1.193	-	-
Durigid 3/6 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	430	-	-
Microfibres d'acier 020/10	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	60	-
Fluidifiant à base de PCE	[kg/m <sup>3</sup> ]	17	15	18
Eau	[kg/m <sup>3</sup> ]	149	158	168

#### Caractéristiques mécaniques après stockage des éprouvettes dans l'eau pendant 28 jours

Résistance en flexion 3 points*	[MPa]	23	20	18
Résistance en compression des prismes*	[MPa]	180	150	130
Résistance en compression des cylindres**	[MPa]	150	130	120
Module d'élasticité statique**	[MPa]	80.000	50.000	45.000

\* Prismes 4 cm x 4 cm x 16 cm | \*\* Cylindres ø= 15 cm, h = 30 cm



Fig. 3: Bâti pour bras robotisé  
(photo: FPT Robotik GmbH & Co. KG)

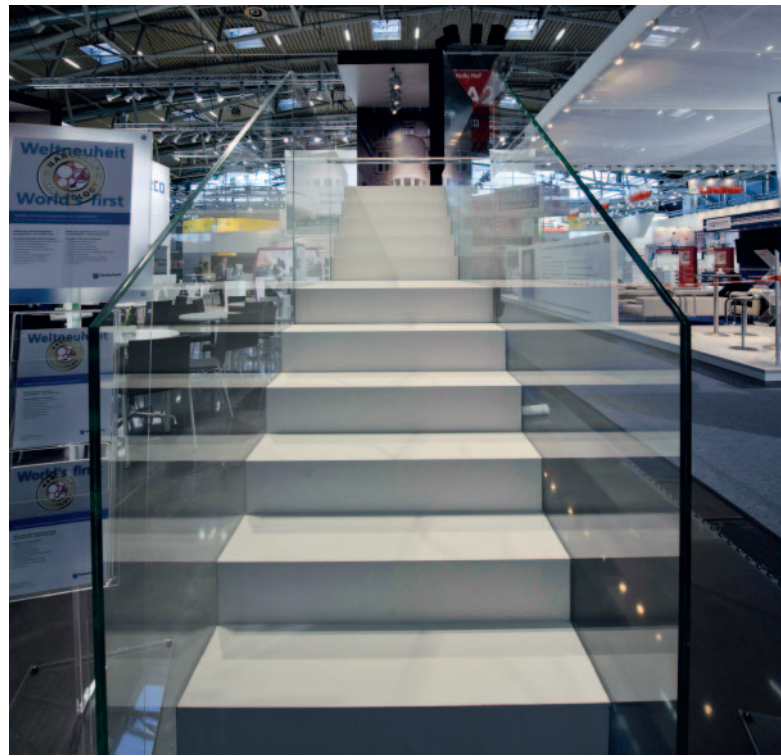


Fig. 4: Escalier de démonstration

La géométrie de ces éléments est souvent très complexe. Le BUHP autocompactant permet l'utilisation de coffrages en bois ou synthétiques. Ceci évite, comme cela est nécessaire pour les bétons à base de polymères, de fastidieuses opérations de compactage dans des coffrages métalliques. Comparé aux métaux tels que la fonte ou l'acier, le BUHP est non seulement facile à mettre en œuvre mais présente également d'autres avantages, notamment en ce qui concerne l'amortissement des vibrations. Les machines-outils devenant de plus en plus rapides et la précision de l'usinage dépendant largement du comportement vibratoire du banc de production, le recours au BUHP permet d'allonger le cycle de vie des outils de 10 à 20% par rapport à des structures en acier soudées.

#### Nanodur pour la réalisation d'éléments de construction préfabriqués spéciaux

Étant donné que le prémélange Nanodur Compound 5941 n'est pas un liant normalisé, son utilisation dans les applications constructives en Allemagne est limitée aux éléments structuraux spéciaux. Un premier démonstrateur a été exposé au salon BAU 2011 à Munich. Il s'agit d'un escalier sans limon, sous forme d'un ouvrage plissé de seulement 29 mm d'épaisseur, collé entre deux vitres de sécurité en verre laminé de 20 mm d'épaisseur. Un essai de charge réalisé à l'Université technique de Dresde a mis en évidence une capacité portante d'environ 2 t par marche. Le béton de granulométrie fine, renforcé de 75 kg/m<sup>3</sup> de microfibres en acier présentait une bonne ouvrabilité à l'état frais. En l'absence d'armatures en acier classiques, son comportement ductile lui a permis de supporter la charge jusqu'à présenter une flèche de 3 mm [7].



Fig. 5: Concentrateur parabolique

Les concentrateurs paraboliques sont utilisés dans les centrales solaires pour produire de l'énergie en focalisant les rayons du soleil. La plupart des concentrateurs sont conçus avec un châssis à treillis en acier. A des fins de recherche, un consortium interdisciplinaire regroupant des acteurs économiques et scientifiques, dirigé par le Centre aérospatial allemand (DLR), a développé un démonstrateur grand format en BHP, basé sur une idée de l'Université de Kaiserslautern et de la Ruhr-Universität de Bochum. Les réflecteurs des deux concentrateurs de 12 m de long et 6 m de large, réalisés à l'usine de préfabrication Stanecker à Borchten, sont constitués de plaques en aluminium collées. Le châssis et les compo-



Fig. 6: Bassin d'élevage de crevettes



Fig. 7: Le pont de Walsler (photo: Rainer Retzlaff)

sants mécaniques tels que les engrenages à roues dentées du système de poursuite du soleil ont directement pu être réalisés par la TU Kaiserslautern avec un BUHP basé sur du Nanodur Compound 5941 [8].

En coopération avec l'entreprise de construction Drössler de Siegen et Green Aqua Farming basée à Grevesmühlen, des systèmes constructifs modulaires ont été conçus à partir d'éléments en BUHP assemblés par collage pour former un bassin d'élevage de crevettes à deux étages de 35 m de long et 5 m de large. Les éléments, d'une épaisseur de paroi de seulement 60 mm, ont été fabriqués sans armatures avec un béton



Fig. 8: Enveloppe d'un bâtiment au Qatar (photo: Ayman Badr)

formulé à base de Nanodur Compound 5941. Après montage, les joints entre éléments ont été scellés avec des éclisses en BUHP fixés avec une colle à base de résine réactive. Un mortier hydraulique, homologué pour une utilisation en contact avec de l'eau potable, assure l'étanchéité de l'assemblage [9].

Le pont de Walsler à Oberstdorf fait partie du système de protection contre les inondations de la rivière Stillach. Son garde-corps est un prolongement de la digue de protection contre les crues. En cas de crue, la faible section d'écoulement au droit du pont fait office de retenue contrôlée de l'eau.



Fig. 9: Réhabilitation d'un pont (photo: TU Graz)

C'est pourquoi le nouveau garde-corps a dû être réalisé en tant qu'élément non-ajouré. En raison des collisions prévues avec des corps flottants et d'une forte exposition aux cycles de gel-dégel, une conception particulièrement robuste s'est avérée nécessaire. Afin de minimiser les coûts, seule la paroi extérieure du garde-corps a été réalisée en tant qu'élément préfabriqué en BUHP avec du Nanodur Compound 5941 dans l'usine Bayer à Munderkingen [10].

Au Qatar, l'enveloppe d'un bâtiment a été réalisée avec des panneaux très minces d'une longueur moyenne de 6 m préfabriqués en BUHP. En combinant des granulats spéciaux avec du Nanodur Compound 5941, Doha Cladding Solutions a formulé un béton atteignant une résistance à la compression de l'ordre de 170-180 MPa (sur éprouvettes cubiques) et une résistance à la traction par flexion de pratiquement 25 MPa à 56 jours.

#### Nanodur pour la réhabilitation d'ouvrages d'art (béton coulé en place)

Un projet pilote réalisé en Autriche à l'initiative de l'Université Technologique de Graz, a permis de valider l'aptitude à l'emploi d'un système de renforcement de ponts avec du BUHP. Quelques 40 m<sup>3</sup> de BUHP formulé à partir de Nanodur Compound 5941 ont été fabriqués dans une centrale de béton prêt à l'emploi et coulés en place. L'objectif était d'augmenter la capacité portante du pont d'une part et d'assurer l'étanchéité en remplacement du revêtement bitumineux d'autre part. Le squelette granulaire a été optimisé afin de satisfaire à une mise en place en pente avec jusqu'à 4,5% de déclivité. Des résistances en compression s'élevant à 146 MPa à 28 jours et 172 MPa à 98 jours ont été mesurées sur éprouvettes cubiques de 100 mm d'arête. La résistance à la traction par flexion obtenue à l'essai 4 points sur des poutres de 150 x 150 x 700 mm était de 11,5 MPa et le module d'élasticité atteignait 52 000 MPa [11].

Les exemples ci-dessus documentent l'expérience acquise dans des domaines d'application très variés avec les liants de type Flowstone et Nanodur Compound 5941. Des projets de recherche et développement attestent du potentiel d'optimisation en cimenterie de ces produits [12]. Cependant, étant



Fig. 10: Le pont Ewijk (photo: Bart van Hoeck)

donné qu'il s'agit de mélanges principalement composés de constituants cimentaires et de granulats secs et non de ciments normalisés, leur utilisation à des fins constructives n'est possible en Allemagne qu'après une évaluation technique impliquant des procédures longues et coûteuses. Celles-ci débouchent soit à une autorisation d'application individuelle limitée à un projet déterminé (ZiE), soit à une autorisation générale d'application par homologation (abZ) du DiBT - Institut allemand d'approbation des produits et techniques de construction dont le coût peut s'avérer exorbitant. Le recours à ce type de procédé constructif, plus coûteux à la fabrication mais plus avantageux sur le long terme du fait d'une durée de vie et de service allongée, reste de ce fait actuellement limité à des applications de niche.

La situation est différente lorsqu'il s'agit de bétons à haute résistance fabriqués à base de ciments normalisés. La technologie Mikrodur de Dyckerhoff permet ainsi d'obtenir la compacité matricielle recherchée grâce au recours à des composants cimentaires ultrafins à granulométries optimisées sans addition de fumées de silice.

De ce fait, un béton de classe de résistance C90/105 peut être mis en œuvre aux Pays-Bas sans agrément particulier. En Allemagne, une autorisation d'application individuelle ou générale reste nécessaire pour les bétons de classe de résistance  $\geq$  C90/105.

#### VARIODUR® ciments normalisés pour bétons HP et UHP

Pour des applications de renforcement d'ouvrages d'art, la résistance à la compression du béton n'est qu'un paramètre de dimensionnement. La résistance à la traction par flexion et le module d'élasticité en combinaison avec les armatures conventionnelles et les fibres d'acier doivent garantir le transfert des charges. Pour supporter les contraintes élevées auxquelles sont soumis les ponts routiers en raison des variations de température et pour assurer une bonne résistance aux cycles de gel-dégel, une structure matricielle extrêmement dense est indispensable. Aux Pays-Bas, des BHP ont été utilisés avec succès dans différents projets de rénovation de



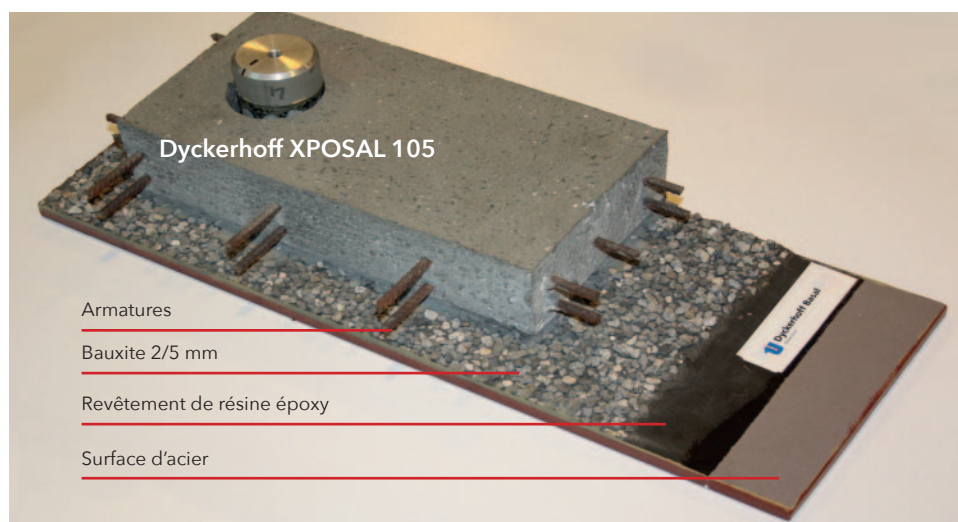


Fig. 11:  
Principe constructif

ponts. Ceci soit au travers de formulations spécifiques de bétons prêt à l'emploi à base de ciment ordinaire et de fumée de silice, soit en recourant à des ciments premium de Dyckerhoff basés sur la technologie Mikrodur comme uniques liants. Cette dernière solution a permis d'assurer des cadences de production en centrales BPE et de mise en œuvre sur place élevées.

#### XPOSAL® 105 en réhabilitation d'un pont avec du prêt à l'emploi BHP à base de ciment normalisé CEM II/B-S 52,5R Variodur 30

Le pont d'Ewijk enjambe la rivière Waal aux Pays-Bas. Il a été construit en 1976. Il fait partie de ces ponts en acier qui, avant leur remise en état, n'étaient plus en mesure de supporter les charges de trafic actuelles. Aux Pays-Bas, une méthode éprouvée consiste à renforcer le tablier au moyen d'une couche de revêtement en béton armé à haute résistance (C90/105). Ceci réduit de 80% les contraintes à reprendre par la dalle portante du tablier comparé à un revêtement asphaltique et augmente ainsi considérablement la durée de vie du pont. La composition du béton à haute résistance utilisé à cette fin

pour le pont d'Ewijk a été formulée par Dyckerhoff Basal en collaboration avec l'Institut Wilhelm Dyckerhoff de Wiesbaden. Cette formulation, à base de ciment normalisé CEM II/B-S 52,5R Variodur 30, a débouchée sur un béton de classe de résistance C90/105 robuste et hautement performant, l'Xposal 105. Ce béton a été livré à partir de la centrale BPE de Dyckerhoff Basal d'Arnheim. Endéans 20 jours de bétonnage, répartis entre juin et décembre 2016, ce sont au total quelque 2400 m<sup>3</sup> d'Xposal 105 qui ont été fournis. Deux bétonnages ont été effectués de nuit. Pour sa mise en place sur 8 cm d'épaisseur, le consortium d'entreprises en charge du chantier (Strukton et Ballast Nedam) a développé une table de finissage spécifique imposant de sévères exigences quant à la régularité du béton. Développant une énergie de compactage élevée, cette table est en mesure d'assurer une forte liaison entre le béton et l'acier sur une largeur de mise en œuvre de 12 mètres. A la vitesse de 20 cm par minute, 100 m de dalle on a pu être traités par jour. L'adhérence avec la surface métallique a été assurée grâce à une couche de liaison constituée de bauxite et de résine époxy. En complément des armatures en acier classiques, des fibres d'acier à raison de

Tableau 3: Exigences de performances du béton

Classe de résistance / d'exposition	C90/105 / XF4
Valeur d'étalement	F3/ F4: 450-500 mm
Temps d'ouvrabilité	≥ 2 heures
Teneur en air	≤ 2,0 %
Masse volumique	≤ 2.500 kg/m <sup>3</sup> (±5 %)
Résistance en traction par flexion	10 MPa (±15 %)
Module d'élasticité	50.000 MPa (±10 %)
Retrait endogène	≤ 3,0 ‰
Résistance au gel/dégel avec agents de déverglaçage	≤ 100 g/m <sup>2</sup>
Migration des ions chlorures	≤ 2,0 * 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /sec
Fraction granulaire 2/5	Résistant à la réaction alcali-silice
Fibres d'acier (L = 12,5 mm, ø = 4 mm)	≥ 75 kg/m <sup>3</sup> (distribution homogène)

75 kg/m<sup>3</sup> ont été incorporées au béton au moyen d'une nouvelle installation de dosage dans la centrale à béton [13].

**Formulation de béton à ultra-haute résistance à base de ciment normalisé CEM III/A 52,5 R Variodur 40 sans fumée de silice**

Le ciment premium CEM III/A 52,5 R a fait ses preuves dans diverses compositions satisfaisant à de hautes exigences en termes de durabilité. Ceci a par exemple été le cas pour la fabrication des tuyaux en béton du projet d'assainissement du parc naturel de l'Emscher, dans la Ruhr [14], ou pour la réalisation de quais préfabriqués destinés à la British Rail [15]. Il était donc évident de choisir ce ciment pour effectuer les premiers essais de formulation de bétons de classes de résistance égales ou supérieures à C130/145. Objectif : mettre au point une formulation simple, sans exigences particulières relatives à un quelconque empilement granulaire. De nombreux essais effectués sur du BUHP confectionné à base de Nanodur avec un mélange de granulats constitué de 30% de

sable 0/2 mm et de 70% de gravillons 2/5 mm avaient déjà permis de valider l'atteinte de hautes résistances. L'incidence sur la résistance en compression du dosage en ciment et du rapport e/c d'une part, ainsi que du dosage d'un fluidifiant PCE spécifique d'autre part, est représentée dans les tableaux ci-après (Fig. 12, 13).

Sans recours à des additions réactives telles que la fumée de silice, le dosage optimal pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance à la compression > 150 MPa est d'environ 700 kg/m<sup>3</sup> de CEM III / A 52,5 R Variodur.

En dépit d'un faible rapport e/c (0,20), une bonne ouvrabilité (valeur d'étalement: 430 mm) est obtenue grâce au recours à un fluidifiant PCE spécifique. Cependant, comme le montre l'évolution de la température du béton à jeune âge (Fig. 14), des dosages élevés de fluidifiant retardent le développement de la résistance. En préfabrication, une formulation avec un faible rapport e/c nécessitant un dosage en fluidifiant de

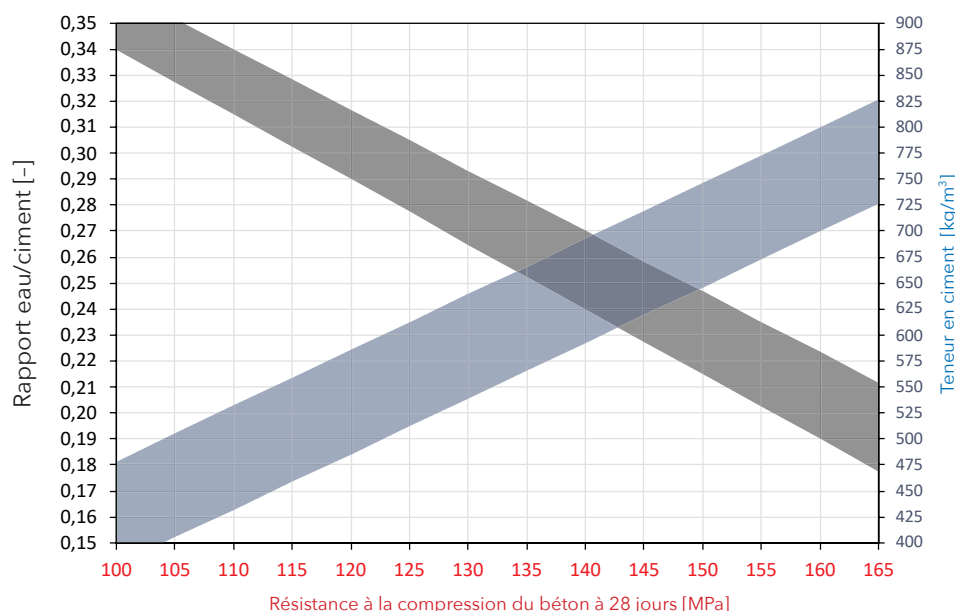


Fig. 12: Dosage en ciment et rapport eau/ciment

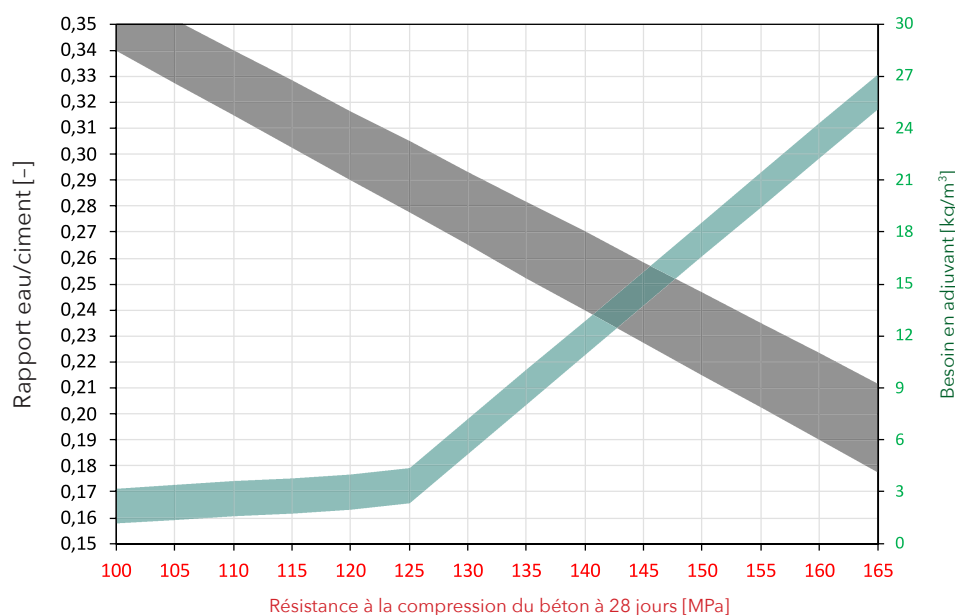


Fig. 13: Dosage en fluidifiant et rapport eau/ciment

Evolution de la température dans le béton

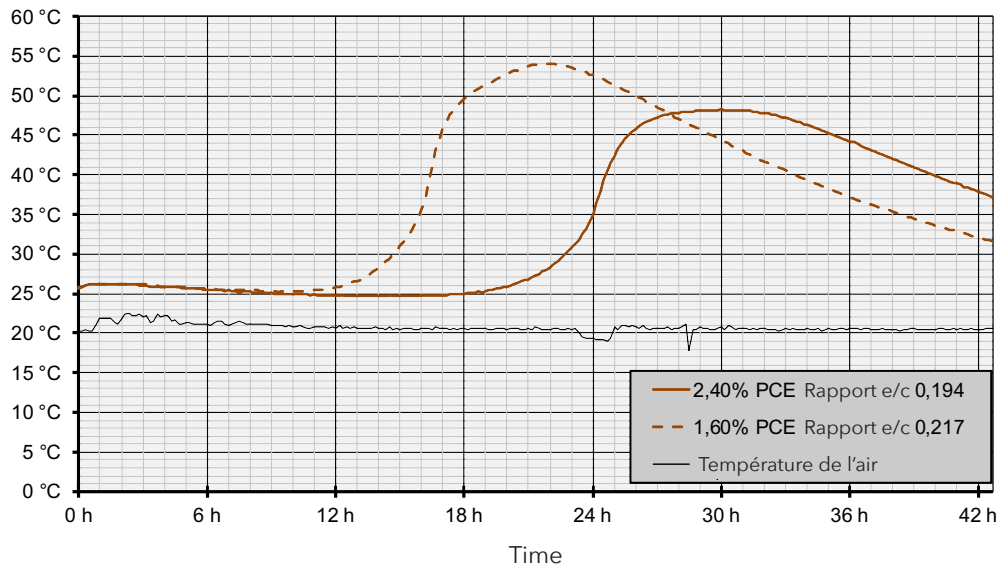


Fig. 14: Evolution de la température

l'ordre de 2,4 % en masse de ciment, ne présente qu'un intérêt limité du fait d'un développement de la résistance à la compression ne dépassant pas 15 MPa à 24 heures. En portant le rapport e/c à 0,22 il est cependant possible de ramener le dosage en fluidifiant à 1,6% -M. Ceci permet un développement significatif des résistances dès 16 heures et l'atteinte d'une valeur de résistance en compression de l'ordre de 40 MPa au bout de 20 heures. Cette augmentation du rapport e/c entraîne une réduction de la résistance finale de l'ordre de 5 à 10%. Comparée aux formulations de BUHP décrit dans la littérature spécialisée, basées sur l'utilisation d'agrégats fins, de ciment Portland et de fumée de silice, le recours à ciment normalisé CEM III / A 52.5 R Variodur 40 comme unique liant, permet, outre une réduction des coûts, d'abaisser d'environ 30% les émissions de CO<sub>2</sub> liées au béton.

**Formulation de béton ultra-haute résistance à granulométrie fine à base de ciment normalisé CEM III/A 52,5 R Variodur 40, sans fumée de silice, avec addition de microfibres d'acier**

A l'instar de la Suisse [16], il devient de plus en plus courant de recourir à des BUHP à granulométrie fine et à teneur élevée en fibres d'acier pour procéder à des renforcement de chaussées. La compacité du béton est assurée par un calibrage spécifique des agrégats endéans un fuseau granulométrique < 1 mm combiné à l'utilisation de fumée de silice [17]. En comptant les adjuvants, ces formulations peuvent nécessiter le recours à plus de 10 constituants différents. Ceci complique considérablement la production en centrale de béton prêt à l'emploi du fait d'une disponibilité généralement limitée de silos et d'installations de pesage et de dosage adéquates.



Fig. 15: Béton à ultra-haute résistance de granulométrie 0/5



Fig. 16: BUHR à granulométrie fine

Tableau 4: Compositions standards

Formulations de BUHR à hautes performances		Granulométrie grossière		Granulométrie fine	
VARIODUR 40 CEM III/A 52,5 R	kg/m <sup>3</sup>	700	900	900	
UHPC Additive CEM III/C 52,5 N	kg/m <sup>3</sup>	-	-	80	
Sable de quartz fin 0,063/0,25 mm	kg/m <sup>3</sup>	-	1.230	1.150	
Sable du Rhin 0/2 mm	kg/m <sup>3</sup>	480	-	-	
Gravillons de basalte de qualité supérieure 2/5 mm	kg/m <sup>3</sup>	1.300	-	-	
Microfibres d'acier	kg/m <sup>3</sup>	-	200	200	
Fluidifiant PCE permettant des rapports e/c faibles	kg/m <sup>3</sup>	17	25	22	
Eau (incl. la teneur en eau du fluidifiant)	kg/m <sup>3</sup>	136	196	196	
Rapport e/c	-	0,20	0,22	0,20	
Valeur d'étalement	mm	430	450	510	
<b>Propriétés du béton durci à 28 jours</b>					
Résistance à la compression sur cube	MPa	162	157	173	
Résistance à la compression sur cylindre	MPa	158	145	157	
Module d'élasticité	MPa	55.600	43.900	46.800	
Résistance à la traction par flexion	MPa	-	22,0	22,3	

Les constituants sont ainsi souvent ajoutés à la main, ce qui est certainement possible d'assumer dans le respect des exigences de santé et de sécurité au travail pour des projets pilotes, mais difficile à transposer de manière économique sur le long terme. Les BUHP conventionnels sont constitués d'à peu près 50% de liant à base de ciment Portland et de fumée de silice. Vu les rapports e/c généralement très faibles, seule une partie du liant participe à la réaction hydraulique. Plus de 60% du ciment et plus de 20% de la fumée de silice ne sont ainsi pas activés et se retrouve de ce fait inclus sous forme « d'agrégats de qualité supérieure », à la matrice du béton. [18]. Afin de simplifier les compositions mentionnées, un BUHR à granulométrie fine (Tab. 4) a été formulé en recourant uniquement à du CEM III / A 52.5 R Variodur 40, un sable de quartz fin, des microfibres d'acier et un fluidifiant spécifique permettant d'assurer de faibles rapports e/c.

En fonction de l'application prévue, un béton C130/145 peut ainsi être confectionné avec des teneurs en fibres variant de 200-250 kg/m<sup>3</sup>, des rapports e/c de 0,20 à 0,24 et des dosages en ciment de 42 à 49% rapportés au mélange granulaire sec.

**Formulation de béton ultra-haute résistance à granulométrie fine à base de ciment normalisé CEM III/A 52,5 R Variodur 40 et d'un additif BUHP constitué de CEM III/C 52,5 N**

Les formulations de BUHR riches en fibres présentent une stabilité suffisante pour une mise en œuvre en pente et une ouvrabilité adaptée aux tables de finissage telles qu'utilisées pour l'assainissement des tabliers de ponts. La faible épaisseur des couches présuppose une ductilité élevée. Celle-ci est assurée par la qualité de liaison entre les microfibres

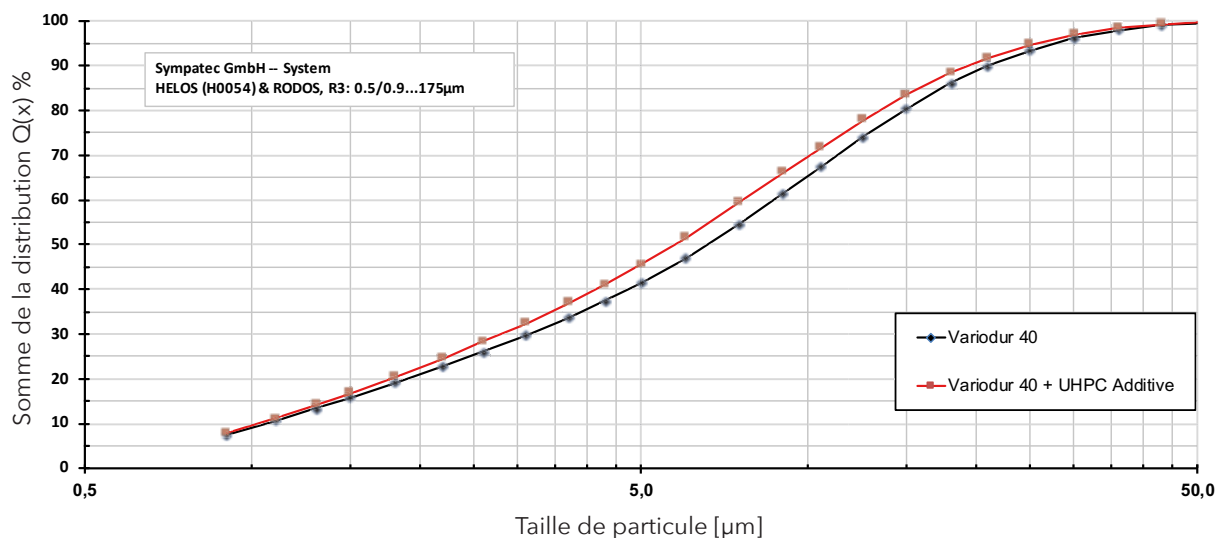


Fig. 17: Granulométrie laser



Foto: VENTUR GmbH

**VENTUR 4.0 – Du béton à ultra-hautes performances avec Dyckerhoff VARIODUR®**  
Prêt à relever de nouveaux défis!

[www.dyckerhoff.com](http://www.dyckerhoff.com)

**ventur**  
Wind turbine towers  
Simple. Unrestricted.

**Dyckerhoff**

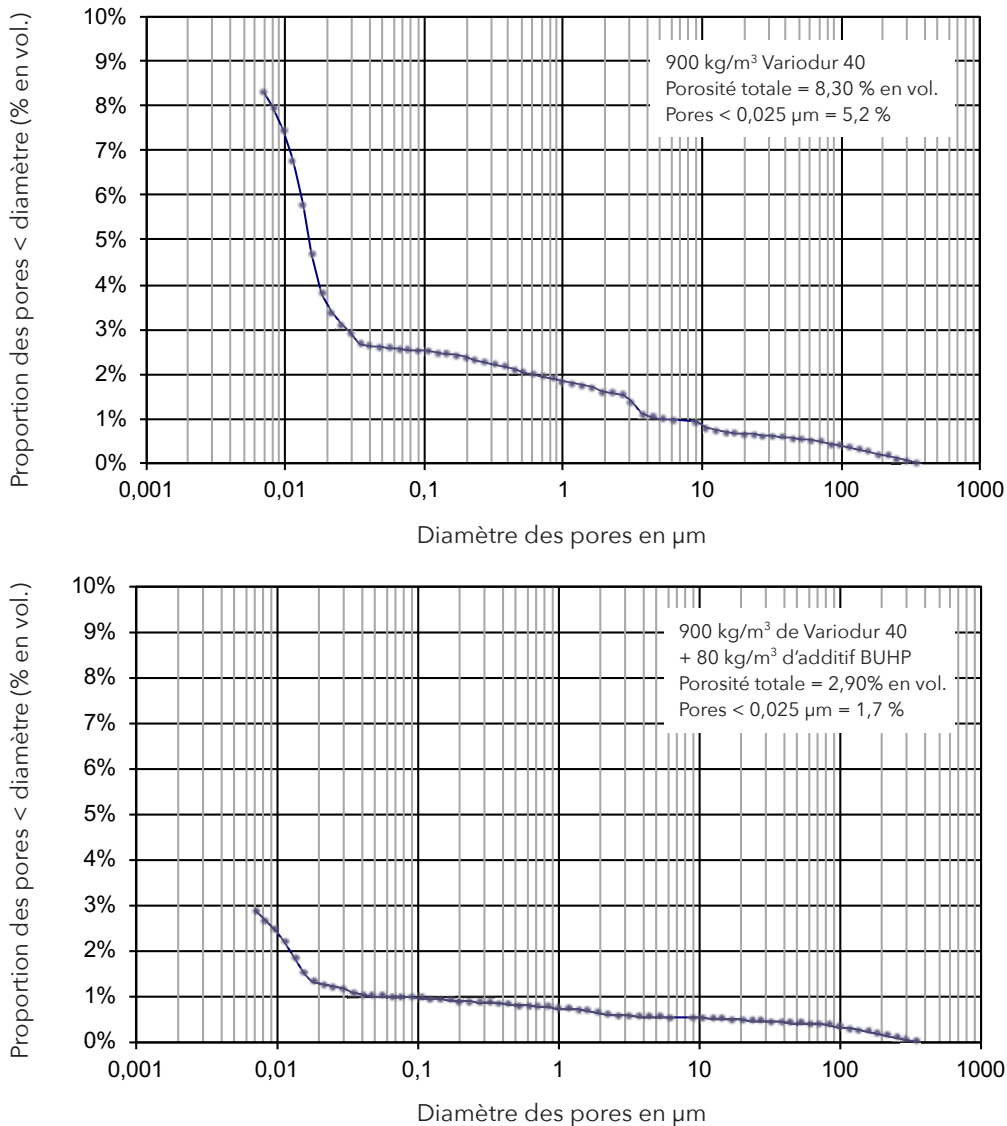


Fig. 18: Modification de la distribution totale des pores par l'addition de 80 kg/m<sup>3</sup> d'additif BUHP

d'acier et la matrice cimentaire. L'additif pour BUHP, normalisable en tant que ciment de type CEM III / C 52,5 N, augmente la compacité de la matrice grâce aux particules fines ( $d_{95} < 9,5 \mu\text{m}$ ) qui le composent. En substituant 80 kg/m<sup>3</sup> d'additif au sable quartz, la teneur en eau de la formulation standard reste constante avec un peu moins de 200 kg/m<sup>3</sup>. Le rapport e/c passe ainsi de 0,22 à 0,20 et la résistance à la compression augmente d'environ 10%. L'étalement augmente quant à lui de 460 à 510 mm alors que le dosage en fluidifiant peut être réduit de 25 à 22 kg/m<sup>3</sup>. La granulométrie laser permet de constater une répartition plus fine du mélange Variodur 40 avec additif BUHP comparée à celle du Variodur 40 seul (Fig. 17).

La porosimétrie au mercure montre une baisse significative de la porosité totale, qui passe de 8,3% à 2,9% en volume, ainsi qu'une réduction des pores < 0,025 µm qui passe de 5,2% à 1,7%.

Le comportement en traction par flexion révèle une augmentation de la résistance à la traction simple en post-fissuration imputable à l'additif BUHP.

Une formulation simple, basée sur du ciment CEM III / A 52,5 R Variodur 40, du sable de quartz 0,063/0,25 mm, un fluidifiant pour de faibles rapports e/c et 200 kg/m<sup>3</sup> de microfibres d'acier, suffit à la production d'un béton de classe C130/145 répondant aux exigences allemandes.

En cas d'exigences accrues concernant la ductilité, la formulation du BUHR peut être optimisée par l'ajout d'additif BUHP de type CEM III C 52,5 N. Ceci permet par exemple de satisfaire aux spécifications de la note d'information relative au BFUP SIA 2052 de l'Association Suisse des Ingénieurs et Architectes.

De manière générale, toutes les compositions présentées dans cet article sont issues de concepts permettant le développement de formulations ciblées de BUHR tout en tenant compte des exigences spécifiques des projets et des matières premières disponibles. La composition standard à quant à elle déjà pu démontrer sa pertinence dans différents projets.

## Résumé et conclusion

La compacité matricielle des bétons à hautes performances augmente considérablement les résistances en compression et en traction par flexion de même qu'elle accroît la résistance aux attaques chimiques et aux contraintes mécaniques. Ceci entraîne une amélioration des caractéristiques fonctionnelles et renforce la durabilité du matériau. Les solutions présentées dans cet article s'appuient sur les avancées technologiques du ciment. Elles ne nécessitent pas d'additions pouzzoloniques telles que la fumée de silice et peuvent être réalisées avec des granulats courants dans des installations de production de béton usuelles.

- Flowstone: prémélange de liant pour bétons hautes performances autocompactants en préfabrication
- Nanodur: prémélange de liant pour bétons ultra-hautes performances autocompactants pour éléments de structure spéciaux et la fabrication de machines-outils

Dans le domaine de la construction, le recours aux bétons hautes performances, bien que plus cher à la production comparée au béton ordinaire, se rentabilise généralement en quelques années du fait des réductions de sections et du gain de surface inhérent.

Leur utilisation a été éprouvée dans diverses applications depuis plusieurs années déjà. En Allemagne, leur utilisation à des fins constructives ne reste cependant possible qu'avec une autorisation d'application individuelle (ZiE), ou une autorisation générale d'application par homologation (abZ). Les utilisations possibles étant encore restreintes, le coût élevé de ces procédures d'autorisation demeure en général disproportionné par rapport au bénéfice réalisable.

- Variodur: ciment normalisé destiné à la formulation de BHP et de BUHR sans fumée de silice pour la préfabrication et le béton prêt à l'emploi ainsi que pour la réparation et le renforcement de structures d'ouvrages.
- Additif pour BUHP: ciment normalisable de moultre ultrafine destiné à l'optimisation granulométrique de toutes les formulations de BHP et de BUHR.

Afin de valoriser les résultats obtenus lors de différents projets de recherche et développement bénéficiant de subventions publiques [12], Dyckerhoff est constamment à la recherche de nouvelles méthodes permettant la production de bétons à hautes performances de composition simple avec des constituants normalisés. Grâce aux connaissances acquises, il est dorénavant possible de combiner l'utilisation de fluidifiants spécifiques permettant de maintenir de faibles rapports e/c avec des ciments normalisés basés sur la technologie Mikrodur, elle-même éprouvée depuis de nombreuses années. Il a ainsi été possible de simplifier progressivement la formulation des bétons au lieu de tenter d'intégrer de nouveaux constituants supposés appropriés dans des compositions déjà complexes.

L'emploi de ciments normalisés, sans additions réactives telles que p.ex. la fumée de silice, simplifie par ailleurs les procédures de certification. Un additif normalisé pour BUHP permet de moduler les performances du béton afin de répondre à des exigences particulièrement élevées. Quelle que soit l'application, il est ainsi possible de proposer une solution

adaptée au travers d'une formulation de béton simple et facile à mettre en œuvre. Ceci contribue à la promotion des bétons à hautes performances. A l'avenir, le nombre d'appellations telles que décrites au début de cet article devrait s'en trouver réduit.

De manière générale, l'avantage des bétons à hautes performances en termes d'impacts environnementaux réside d'une part dans l'allongement de la durée de vie des ouvrages du fait d'une durabilité accrue, et d'autre part dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> induite par la possibilité d'affiner les sections et donc le volume de béton mis en œuvre. Le ciment normalisé CEM III / A 52.5 R Variodur 40 utilisé comme seul liant hydraulique constitue une alternative intéressante sur le plan économique par rapport aux formulations habituelles de BUHR combinant ciment Portland et fumée de silice. En tant que ciment de haut fourneau, sa production ne génère que 60% du CO<sub>2</sub> émis par ces derniers et contribue ainsi significativement à l'amélioration des performances environnementales évoquées. ■

## Références bibliographiques

- [1] [https://de.wikipedia.org/wiki/Turmbau\\_zu\\_Babel](https://de.wikipedia.org/wiki/Turmbau_zu_Babel)
- [2] [https://de.wikipedia.org/wiki/Ultrahochfester\\_Beton](https://de.wikipedia.org/wiki/Ultrahochfester_Beton)
- [3] <https://www.beton.wiki/index.php?title=Hochleistungsbeton>
- [4] Zement-Taschenbuch 51. Ausgabe, 2008
- [5] OLAF: Abschlussbericht BMBF Projekt OLAF (FK 03X0066A Dyckerhoff), TIB- Hannover, 2012.
- [6] Sagmeister, Bernhard; Maschinenteile aus zementgebundenen Beton, Beuth Verlag, Berlin, 2017. ISBN 978-3-410-27186-4
- [7] Curbach, M.; Schladitz, F.; Untersuchungsbericht zur Tragfähigkeit einer Treppe der Dyckerhoff AG, TU Dresden 2012 (unveröffentlicht)
- [8] Forman, Patrick et al.; A concrete solar collector, VGB Power Tech 9/2018
- [9] Deuse, Thomas et al.; Hochleistungsbeton mit Klebeverbindung. BetonWerk International, 6/2014.
- [10] Sagmeister, Bernhard et al.; Verschleißfeste Schutzschichten aus UHPC, Der Bauingenieur, Band 94, Mai 2019
- [11] Hadl, Philipp. et al.; Anwendung von UHPC als direkt befahrener Aufbeton bei der Integralisierung eines bestehenden Brückenbauwerks in Österreich. Beton- und Stahlbetonbau 2/2015
- [12] Deuse, Thomas et al.; Nanotechnically optimized binders for the production of user-friendly high-performance concrete, Issue No.: 1 and 5 of Cement International 2018
- [13] Laurini, G; Tragplatte der Ewijk-Brücke verstärkt: Decklage aus hochfestem Beton, beton 6/2018
- [14] Diefenseifen, Maik et al.; Beton mit hohem Säurewiderstand, Betonwerk International, 6/2008
- [15] Grebe, Rainer et al.; Bahnsteige für England mit hohem elektrischen Widerstand, BFT International 09/2009
- [16] Brühwiler, Eugen; „Revitalisierung“ von Brücken mittels UHFB, Vortrag beim 4. Grazer Betonkolloquium, Graz 2018
- [17] Orgass, Marko et al.; Überführungsbauwerk der L 3378 bei Fulda-Lehnerz, Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), Heft 11
- [18] Heinz, Detlef; UHPC mit alternativen Bindemitteln, Vortrag beim 9. Münchener Baustoffseminar, TU München, 2011

## AUTRES INFORMATIONS



Dyckerhoff GmbH, Marketing produits  
 Postbox 2247, 65012 Wiesbaden, Allemagne  
 T +49 611 676 1181  
[marketing@dyckerhoff.com](mailto:marketing@dyckerhoff.com)  
[www.dyckerhoff.com](http://www.dyckerhoff.com)