

# Self-compacting concrete

Autor(en): **Jakob, Frank / Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin du ciment**

Band (Jahr): **68 (2000)**

Heft 1

PDF erstellt am: **17.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-146517>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Self-compacting concrete

Le self-compacting concrete (SCC) est un perfectionnement dans le domaine de la technologie du béton. Le SCC ouvre d'intéressantes possibilités, mais comporte aussi certains risques, en particulier le risque de surévaluation.

## Propriétés du SCC [1]

Les bétons autocompactants (SCC) ou les précurseurs du SCC sont connus depuis longtemps. Il y a plus de 70 ans déjà, des bétons très fluides, dits aussi bétons coulés, qui étaient autocompactants et autonivelants, ont été mis en place aux USA. Leur fluidité élevée était toutefois aux dépens de leur durabilité, car on les obtenait grâce à de hautes teneurs en eau, c'est-à-dire à des rapports e/c élevés. Les bétons fluides non autocompactants fabriqués dans les années 70 avec des superfluidifiants (HBV) sont d'une qualité supérieure. Mais ils n'ont pas pu s'imposer non plus. Des bétons actuellement classés comme SCC ont été utilisés dès 1988 au Japon et au Canada, mais sous la dénomination de «self-compacting high performance concrete» ou «high per-

formance concrete». Les premiers grands projets réalisés avec ces bétons l'ont été en 1990, au Japon. Et en Europe (France, Suède), on utilise finalement le SCC depuis 1996. Ses premières applications en Suisse datent de 1998 [2].

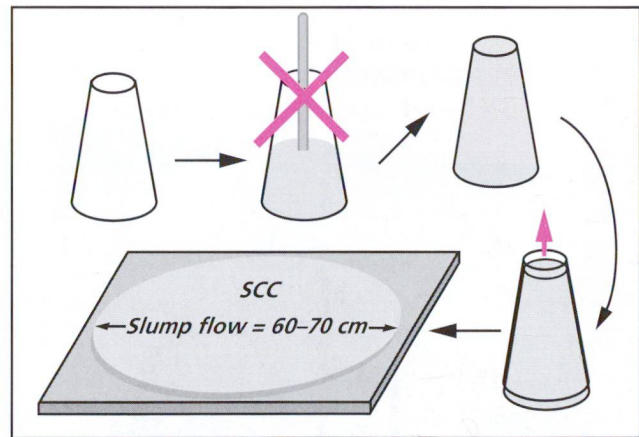


Fig. 1 La détermination du slump flow – une méthode utile pour le contrôle de la consistance du SCC sur le chantier (voir texte).

Graphique: TFB

## Ce qui parle en faveur du SCC

Divers avantages sont avancés comme arguments pour l'utilisation de SCC. L'énumération ci-après n'est pas exhaustive; quelques points sont en outre relativisés plus loin [1,2]:

- béton de qualité plus uniforme sur l'ensemble de la section (moins de «défauts»)
- qualité du béton supérieure, permettant de réduire les dimensions de l'élément de construction
- mise en place sans problème dans des formes de coffrage compliquées ainsi qu'en présence d'armatures denses
- rendements élevés à la mise en place
- moins de nuisances sonores
- durée de construction plus courte.

Ces avantages doivent être mis en regard des inconvénients et risques,

dont font partie [4]:

- dosages plus élevés (ciments et ajouts ainsi qu'adjuvants)
- tendance à un plus grand retrait
- risques généraux d'une «nouvelle» technologie.

Il n'y a pas encore de normes sur les SCC. Des recommandations ont été publiées au Japon [11]. En Suisse, les SCC répondent en général aux exigences de la norme SIA 162 [1].

## Projets de mélange

Lors de la fabrication de SCC, il faut partir de différentes données, entraînant des domaines d'utilisation également différents [1]:

- fluidité élevée pour des bétons sans adjuvants ou en contenant peu, mais haute teneur en eau (rapport e/c > 0,70)

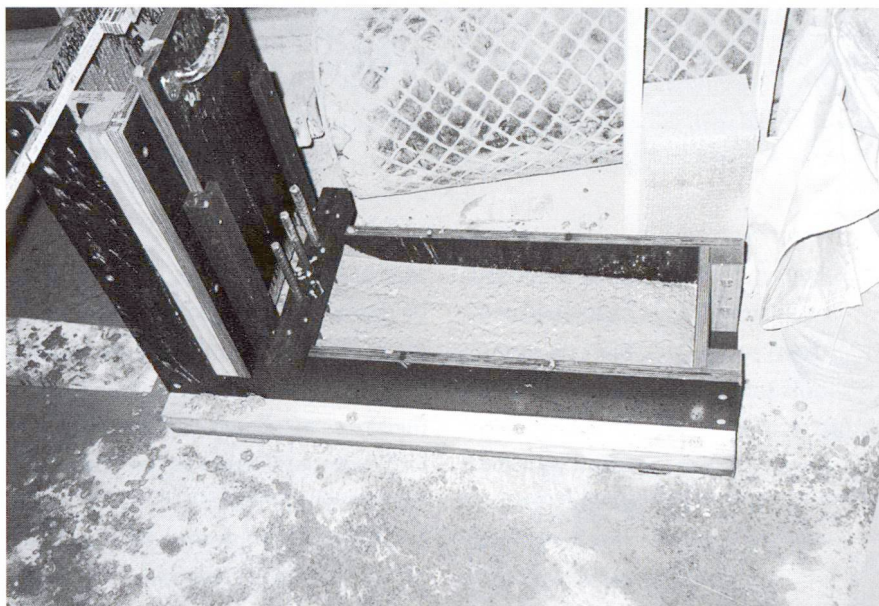
## A propos de cet article

Le présent article est basé en grande partie sur des exposés présentés lors du séminaire du TFB no 994 350 «Self-compacting concrete: Chancen und Gefahren» du 23 novembre 1999 à Wildeggen. Les orateurs étaient:

- [1] Frank Jacobs, TFB, Wildeggen
- [2] Peter Lunk, MBT (Schweiz) AG, Zurich
- [3] Jürg Schlumpf, Sika AG, Zurich
- [4] Felix Hofer, Seekag, Lucerne
- [5] Silvio Schwarz, GU Tiefbau AG, Zurich
- [6] Philipp Truffer, BIAG, Viège.

Des compléments provenant de la littérature spécialisée figurent séparément dans la bibliographie en page 6.





**Fig. 2 Détermination de la consistance avec le box en L suédois; l'espacement des barres d'armature est ici de 34 mm. Avec un SCC, la partie horizontale se remplit en quelques secondes; la surface est à peu près horizontale.**

Photo: TFB

- fluidité élevée pour des bétons avec rapport e/c de < 0,40, principalement grâce aux HBV ou à la combinaison de HBV et d'autres produits (stabilisateurs).

Nous nous concentrons ici sur les SCC avec bas rapports e/c.

Le but est d'obtenir la bonne fluidité avec un volume de pâte de ciment minimal. Cela doit permettre de réduire le développement de chaleur et le retrait, ainsi que les coûts. Pour des SCC de haute qualité, on peut fixer – par dérogation aux formules de béton «usuelles» – les points suivants:

- teneur en liant plus élevée (env. 400 kg/m<sup>3</sup>)
- teneur en fines plus élevée (par m<sup>3</sup> env. 500 kg de ciment, ajouts et sable de  $\varnothing < 0,125$  mm)
- diamètre maximum des granulats

≤ 16 mm; mais < 32 mm également possible)

- granulats «riches en sable» (50 % avec diamètre maximum des granulats de 0/4 mm)
- teneur en eau 180 kg/m<sup>3</sup>.

Les propriétés voulues du béton frais et du béton durci sont déterminantes pour le choix des liants et des adjuvants. Les HBV utilisés sont généralement des produits à base de polycarboxylate nouvellement mis au point. Ils doivent permettre une forte réduction d'eau, assurer la cohésion du béton frais, ainsi que réguler sa fluidité [3].

#### *Propriétés du béton frais*

La consistance des SCC joue un rôle important. Elle ne doit varier que peu, ce qui suppose une production constante. Il faut par exemple tenir

compte de l'humidité propre des granulats, et veiller à ce qu'il ne reste pas d'eau dans les camions bétonnières lors du chargement.

Les SCC sont très coulants. Ils ont un étalement de plus de 55 cm – et cela sans soulever la table. Le «slump flow» a également fait ses preuves, avec lequel le SCC est versé dans le cône d'affaissement en position «normale» ou inversée. Le slump flow déterminé avec la disposition usuelle pour la mesure d'affaissement (*figure 1*) devrait se situer entre 60 et 70 cm. Le temps pour atteindre un slump flow de 50 cm devrait en outre être de 2 à 8 secondes. Ces méthodes de mesure de la consistance conviennent pour les contrôles sur le chantier.

Pour la mise au point des SCC, on a conçu des appareils de mesure spéciaux, par exemple le box en L (*figure 2*) [1]. Dans le box en L, les bétons avec étalement ou slump flow typique des SCC ne répondent pas tous aux exigences posées à un SCC. Ils sont alors qualifiés de bétons de remplissage.

Les coffrages ne doivent pas répondre à des exigences particulières; ils ne doivent pas être plus compacts que les coffrages pour des bétons «normaux». En ce qui concerne la pression sur le coffrage, les informa-



Composant de mélange		SCC 1	SCC 2	SCC 3	SCC 4
Ciment (CEM)					
CEM II/A-L 32,5	[kg/m <sup>3</sup> ]	450	–	450	–
CEM I 42,5	[kg/m <sup>3</sup> ]	–	340	–	330
Cendres volantes (de houille)	[kg/m <sup>3</sup> ]	–	105	–	105
Eau	[kg/m <sup>3</sup> ]	170	185	183	173
Granulats					
0/8 secs	[kg/m <sup>3</sup> ]	1280	1315	1210	1150
8/16 secs	[kg/m <sup>3</sup> ]	415	405	405	375
HBV	[kg/m <sup>3</sup> ]/[%]	8,6/1,9	4,5/1,0	7,7/1,7	3,2/0,75
LP	[kg/m <sup>3</sup> ]	–	–	0,9	2,6
Masse volumique apparente	[kg/m <sup>3</sup> ]	2320	2360	2260	2140
e/(CEM + cendres volantes)	–	0,38	0,41	0,40	0,40
Teneur en air	[%]	3,2	2,1	5,2	6,8

Tab. 1 Composition des mélanges de béton dont les modules d'élasticité et les retraits sont représentés aux figures 3 et 4.

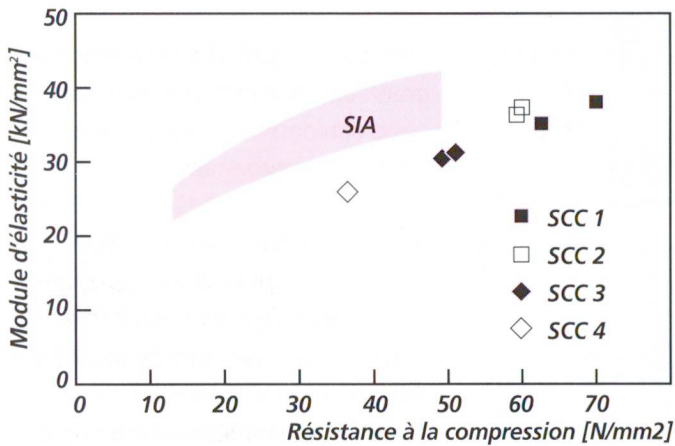


Fig. 3 Rapport entre résistance à la compression et module d'élasticité de SCC (composition des mélanges de béton: tableau 1) et de bétons «normaux» selon norme SIA 162 (zone marquée en rouge) [1].

Graphique: TFB

tions sont contradictoires. Il est recommandé de dimensionner en fonction de la pression hydrostatique. Le cas échéant, le coffrage doit en outre être protégé contre la poussée verticale. Les SCC témoignent d'une résistance élevée à la ségrégation. Les distances de coulée usuelles des SCC sont de 2 à 10 m. Des expériences faites dans la pratique démontrent que la mise en

commencée immédiatement après la mise en place.

#### Propriétés du béton durci

Les surfaces des éléments de construction réalisés avec du SCC sont comparables aux surfaces de béton ordinaires. Aux ouvertures du coffrage, elles sont – malgré l'autocompactage – plus rugueuses que dans la partie coffrée si elles ne sont pas lis-

place peut se faire aussi bien de dessous que de dessus (hauteur de chute jusqu'à environ 2 m) [4]. Il est important que l'air déplacé puisse s'échapper. Les SCC ne refusant pas, la cure peut être

sées à la règle ou talochées.

Le rapport entre module d'élasticité et résistance à la compression est représenté à la figure 3, le comportement au retrait de quatre différents SCC l'est à la figure 4, et la composition de ces quatre SCC figure dans le tableau 1. On remarque que les SCC témoignent d'un module d'élasticité plus faible et se rétractent au début plus rapidement que les «bétons normaux», mais que le retrait est avec le temps à peu près le même.

Les SCC sont plus homogènes que les bétons usuels. Des carottes prélevées dans des murs de 2 m de hauteur montrent que la résistance à la compression ne dépend pas de l'endroit du prélèvement. La durabilité des SCC (e/c 0,40) correspond à celle de bétons de haute qualité [1].

#### Domaines d'utilisation des SCC

Les domaines d'utilisation des SCC sont maintenant déjà très variés. En font partie:

- ponts
- bâtiments industriels
- immeubles-tours
- tunnels
- préfabrication
- remise en état dans le bâtiment
- remise en état dans le génie civil.

Il est résulté d'une estimation que le marché potentiel des SCC en Suisse était d'environ 0,65–1,65 million de

Consommation de béton Utilisation <sup>1)</sup>	Pourcentage	Marché potentiel des SCC
Nouvelle construction	73 %	1–4 %
Préfabrication/production de grès cérame	8 %	10–40 %
Remise en état dans le bâtiment	10 %	25–50 %
Remise en état dans le génie civil	5 %	30–60 %
Commerce, etc.	4 %	–
Marché potentiel des SCC		0,65–1,65 Mio. m <sup>3</sup> (5–15 %)
(Consommation totale de béton en Suisse: env. 12 millions de m <sup>3</sup> )		

<sup>1)</sup> basé sur des enquêtes auprès de centrales à béton régionales

Tab. 2 Estimation du marché potentiel des SCC en Suisse (selon [3]).



m<sup>3</sup> ou 5–15 % de la consommation annuelle de béton (voir *tableau 2*), les domaines d'utilisation principaux étant la préfabrication et les remises en état [3]. Une sélection intéressante d'ouvrages généralement importants, réalisés avec des SCC, figure dans le *tableau 4*.

### Expériences d'un producteur de béton prêt à l'emploi [4]

Une fois que la mise au point des formules est terminée, la fabrication de SCC ne pose aucun problème. Il est toutefois important que les installations soient commandées avec précision.

Avec un slump flow allant jusqu'à 70 cm, les mesures de puissance ab-

sorbée sont relativement imprécises ou même totalement impossibles dans le camion bétonnière (résistance trop faible). C'est pourquoi il faut peser les composants avec précision et tenir compte avec soin de leur teneur en eau.

La composition ainsi que quelques-unes des propriétés d'un mélange standard de SCC figure dans le *tableau 3*.

Pour le transport, les camions bétonnières ont fait leurs preuves. Il faut absolument encore malaxer sur le chantier, car en raison des vibrations, les SCC peuvent se désagréger pendant le trajet.

La vitesse de la mise en place est déterminante pour la qualité de béton apparent (bullage), et elle ne devrait

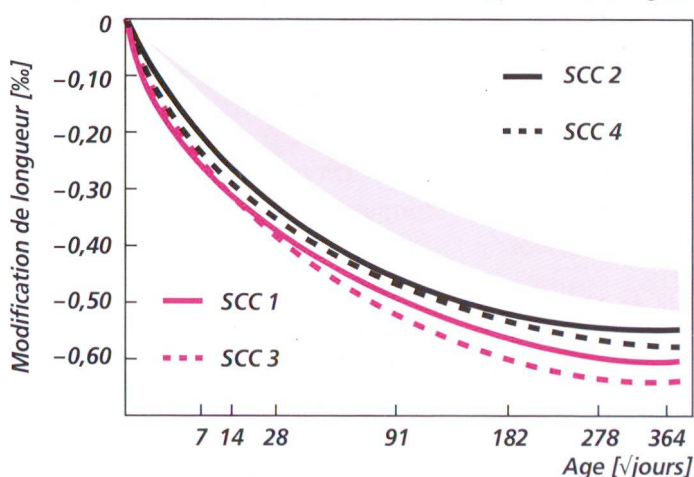


Fig. 4 Retrait de SCC et de «béton normal» (composition des mélanges de béton; *tableau 1*). La zone marquée en rouge correspond à la zone de retrait de bétons avec rapports e/c de env. 0,5 [1].

Graphique: TFB

pas être plus grande que pour un béton traditionnel, sinon de l'air s'accumule entre la surface du béton et le coffrage. En dehors de la mise en place, le mode de coffrage et le produit de décoffrage

Composants du mélange	SCC
CEM I 42,5	325 kg/m <sup>3</sup>
Cendres volantes (de houille)	100 kg/m <sup>3</sup>
Granulats	
0/4 mm	53 %
4/8 mm	15 %
8/16 mm	32 %
HBV	1,2 %
<i>Propriétés du béton frais</i>	
Slump flow	71 cm
e/(CEM I + cendres volantes)	0,40
Masse volumique apparente	2370 kg/m <sup>3</sup>
Teneur en air	1 %
<i>Propriétés du béton durci</i>	
Résistance à la compression	
après 3 jours	38 N/mm <sup>2</sup>
après 7 jours	49 N/mm <sup>2</sup>
après 28 jours	61 N/mm <sup>2</sup>

Tab. 3 Composition et propriétés du «SCC standard» d'une centrale à béton [4].

exercer une influence sur la qualité de la surface du béton. Il est bien sûr possible d'éliminer les bulles en vibrant, mais cela provoquerait la ségrégation.

C'est principalement avec de petites quantités de SCC pour des transformations et rénovations que le producteur de béton prêt à l'emploi a fait ses expériences. Etant donné que l'espace disponible est en l'occurrence souvent des plus réduits, la grande fluidité et l'autocompactage sont d'une grande utilité.

### Une utilisation de SCC un peu spéciale [5]

Le tunnel ferroviaire à double voie de Zurich-Thalwil passe sous, et à faible distance, des bâtiments existants dans la zone de la porte de la place Meinrad Lienert à Zurich. Pour la sécurité de ces bâtiments, une protection tubulaire composée de dix tuyaux de 1,25 m de diamètre intérieur, et en moyenne de 145 m de

longueur, a été réalisée. La pente est de 1,5–2,5 %. Les tuyaux sont dotés d'une armature hélicoïdale.

Il était initialement prévu de réaliser les tuyaux de façon traditionnelle, avec un béton B 35/25, en étapes de 10–15 m de longueur. Il fallait répondre entre autres aux exigences suivantes:

- pas de ségrégation du béton pompé horizontalement au-dessus de l'armature massive
- degré de remplissage très élevé.

On s'est finalement décidé pour un SCC mis en place sous pression, lequel répondait aux exigences ci-dessus et permettait en outre des étapes de 50 m de longueur. Sa teneur en sable était de quelque 50 % et la te-

neur en fines ( $\varnothing < 0,125$  mm) d'environ  $500 \text{ kg/m}^3$ . Autres indications concernant la composition:

granulats:	0/16 mm
CEM II/A-L:	380 $\text{kg/m}^3$
cendres volantes:	50 $\text{kg/m}^3$
HBV:	1,7 % de la masse de ciment.

Un SCC de cette composition répondait à toutes les exigences, même s'il devait être pompé sur une longue distance avant d'être mis en place. Grâce à la nettement plus grande longueur des étapes ainsi qu'au peu de travail nécessaire, on a pu économiser pour le bétonnage des 1350 m de tuyaux plus de 2500 heures de travail; la durée du bétonnage a été réduite de 207 à 93 jours.

### Limites des SCC [6]

Pour la remise en état des têtes de consoles du viaduc de Sidegga au Valais, d'une longueur de quelque 300 m, on a choisi de procéder comme suit: enlèvement hydrodynamique du béton des têtes de consoles existantes et nouveau bétonnage avec du SCC.

Un laboratoire a été chargé de déterminer les formules de SCC appropriées. Le SCC devait être étanche à l'eau, mais non résistant au gel et aux sels de déverglaçage. Il devait en outre témoigner d'un retrait et d'un développement de chaleur faibles. Un SCC contenant le moins possible de liant (ciment et cendres volantes) a servi de point de départ. Sable, gravier et ciment ont été fournis par la centrale à béton. Des analyses rhéologiques faites sur des mortiers ont permis de trouver au laboratoire des compositions appropriées pour le béton. On a ensuite mis au point des formules de béton qui ont été testées aussi bien au laboratoire qu'à la centrale à béton.

Avec la formule jugée la meilleure, on a bétonné sur le chantier une éprouvette d'essai de 4 m de longueur dans un coffrage fermé. Il en est résulté un béton dont la surface présentait dans la zone du contre-coffrage de nombreux trous de 1–2 mm de profondeur et de plu-

## BIBLIOGRAPHIE

En dehors des indications provenant des orateurs du séminaire du TFB, les publications suivantes ont été utilisées:

- [7] **Jacobs, F., Hunkeler, F., et Schlumpf, J.**, «Self-compacting concrete», Schweizer Ingenieur und Architekt 1999 [12], 238–242 (1999).
- [8] «Self-Compacting Concrete», Proceedings of the First International Rilem Symposium (Stockholm 1999), edited by **Skarendahl, Å.**, et **Petersson, Ö.**, Rilem Publications S.A.R.L., Cachan (1999).
- [9] **Nishizaki, T., Kamada, F., Chikamatsu, R., et Kawashima, H.**, «Application of high-strength self-compacting concrete to prestressed concrete outer tank for LNG storage», pages 629–638 dans [8].
- [10] **Jacobs, F., et Hunkeler, F.**, «Design of self-compacting concrete for durable concrete structures», pages 397–407 dans [8].
- [11] **Ozawa, K., et Ouchi, M.**, «Proceedings of the international workshop on self-compacting concrete» (Kochi 1999), CD-ROM.
- [12] **Billberg, P.**, «Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience» publié par le Cement och Betong Institutet, Stockholm (1999).



Ouvrage	Élément de construction	«Formule»	Propriétés du béton	Avantages	Lit.
Akashi Bridge, Japon (le plus long pont haubané)	culée d'ancrage 0,39 million m <sup>3</sup> SCC	ciment et filler calcaire diamètre maximum des granulats ≤ 40 mm		<ul style="list-style-type: none"> <li>durée des travaux réduite de 2,5 à 2 ans</li> </ul>	[2]
Construction de ponts en Suède	mode de construction standard de l'office des routes de Suède	ciment et filler calcaire	e/c < 0,40 béton résistant au gel et aux sels de déverglaçage à résistance élevée à la pénétration de chlorures	<ul style="list-style-type: none"> <li>durabilité améliorée grâce à la qualité uniforme du béton</li> <li>construction plus mince grâce à la résistance élevée du béton</li> </ul>	[2]
Conteneur de gaz liquide en précontrainte au Japon	diamètre: 84,2 m hauteur: 38,4 m épaisseur: 0,8 m 12 000 m <sup>3</sup> SCC 10 monte-charges de 4,4 m de hauteur	ciment: 515 kg/m <sup>3</sup> filler calcaire: 70 kg/m <sup>3</sup> granulats: 0/20 mm HBV: 9 kg/m <sup>3</sup>	e/c 0,33 4,5 % vol. d'air	<ul style="list-style-type: none"> <li>nombre de monte-charges réduit de 14 à 10</li> <li>nombre d'ouvriers spécialisés réduit de 150 à 50</li> <li>durée des travaux réduite de 22 à 18 mois</li> </ul>	[2, 9]
Millennium Tower, Vienne (bâtiment administratif de 50 étages)	surface de base: env. 1000 m <sup>2</sup> hauteur: 185 m	SCC transporté par grue pour le remplissage de colonnes porteuses en acier de 6 m de hauteur	béton B 40/30 (en haut) et B 60/50 (en bas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>réalisation d'éléments de construction de géométrie parfaite</li> <li>plus grande durabilité (vides évités)</li> <li>économie sur les coûts de main-d'œuvre</li> <li>bétonnage sans bruit</li> </ul>	[2]
Centre de la culture de Meudon	béton apparent SCC d'une construction en béton armé composée de béton prêt à l'emploi et d'éléments préfabriqués	ciment blanc et nanosilice		<ul style="list-style-type: none"> <li>surface répondant à de hautes exigences (peu de bullage)</li> <li>plus grande durabilité (pas de vides)</li> <li>économie sur les coûts de main-d'œuvre</li> <li>bétonnage sans bruit</li> </ul>	[2]
Binz-Center 2000, Zurich	cloisons (8,00 x 4,50 m) mises en place ultérieurement sous dalle en béton armé existante	ciment: 300–350 kg/m <sup>3</sup> cendres volantes: 150–100 kg/m <sup>3</sup>	béton frais pompable sur 30 m béton B 35/25	<ul style="list-style-type: none"> <li>plus avantageux que murs en brique silico-calcaire</li> </ul>	
Tunnel Schwimmbad, Reinach	remise en état des parois et piliers	CEM I 32,5: 325 kg/m <sup>3</sup> cendres volantes: 100 kg/m <sup>3</sup>	e/liant 0,48 4,6 % vol. d'air B 40/30, résistant au gel et aux sels de déverglaçage	<ul style="list-style-type: none"> <li>durabilité augmentée grâce à la qualité uniforme du béton</li> <li>surface du béton avec peu de défauts</li> <li>réduction de la durée des travaux</li> </ul>	[2]
Uno City Center, Vienne	consolidation de sous-poutres	CEM I 32,5: 300 kg/m <sup>3</sup> laitier de haut fourneau: 200 kg/m <sup>3</sup> granulats: 0/16 mm	e/c 0,50; e/liant 0,40	<ul style="list-style-type: none"> <li>élément de construction de géométrie parfaite avec teneur élevée en fers d'armature</li> <li>durabilité augmentée (pas de vides)</li> <li>bétonnage sans bruit</li> </ul>	[2]
Pont de la Rempen à Vorderthal (SZ)	remise en état du pont routier en béton armé datant de 1923	béton pompé: CEM II/A-L 32,5: 450 kg/m <sup>3</sup> granulats: 0/16 mm HBV: 1,4 % (en rapport de la masse de ciment) LP: 0,4–0,6 % (en rapport de la masse de ciment)	béton frais: <ul style="list-style-type: none"> <li>e/c 0,38–0,40; air: 4–6%</li> <li>masse volumique apparente: 2280–2320 kg/m<sup>3</sup></li> </ul> béton durci <ul style="list-style-type: none"> <li>résistance à la compression à 28 jours: 45–50 N/mm<sup>2</sup></li> <li>résistance au gel: BE I F: moyenne</li> </ul>		[3]

Tab. 4 Une sélection d'ouvrages en SCC, dont certains très grands.

sieurs cm de diamètre, mais dont les surfaces latérales étaient de bonne qualité. Son étanchéité et sa résistance à la compression étaient élevées.

Après un autre essai préliminaire ayant fourni le même résultat, on a bétonné une première étape de 26 m de longueur, dont la pente lon-

gitudinale était de 7 à 8 %. Le contre-coffrage était doté de plusieurs trous et revêtu d'un lé de coffrage évacuant l'eau. Le pompage a été effectué depuis dessous. Après une coulée du SCC dans le coffrage d'environ 15 m, une fuite est apparue dans le coffrage, ce qui a provoqué une perte de SCC.

Il n'a pas non plus été possible de remédier aux problèmes des trous lors des deux étapes de bétonnage suivantes. En Suède, lors de la construction de ponts avec pentes transversales de 1 à 2 %, des SCC «fermes» mis en place sans contre-coffrage ont fait leurs preuves.

Frank Jakob et Kurt Hermann, TFB