

REVÊTEMENTS EN BÉTON BICOUCHE

INFRASTRUCTURE | AVRIL 2020

(92)

Ef2

- QU'EST-CE QUE LES REVÊTEMENTS BICOUCHES EN BÉTON ?
- APPLICATION POUR REVÊTEMENTS ESTHÉTIQUES ET SILENCIEUX
- COMPOSITION DE BÉTON ET EXÉCUTION





Bruges-Zeebruges, A11 (© Willemen)

Aujourd'hui, la construction de routes modernes fait appel à nombre d'exigences élevées. Non seulement les revêtements routiers doivent être sûrs, confortables et silencieux mais ils doivent aussi répondre à diverses exigences en matière de durabilité. En particulier, la longévité du revêtement impacte positivement le prix de revient mais aussi l'impact environnemental, et ce, pendant toute la durée de vie du revêtement. Il est un fait que les revêtements doivent devenir « plus verts » et s'adapter à la philosophie de l'économie circulaire, le tout avec un coût social limité.

Les routes en béton d'aujourd'hui répondent à un bon nombre de ces exigences, mais il n'est pas toujours facile de satisfaire à l'ensemble des critères.

Le concept de revêtement en béton bicouche permet d'optimiser nombre de critères. Des matériaux de qualité inférieure – granulats artificiels ou granulats recyclés – peuvent, par exemple, être utilisés dans la couche inférieure. Dans la couche supérieure du revêtement, visible en surface, des composants de haute qualité peuvent alors être utilisés pour améliorer les caractéristiques de surface (planéité – distance de freinage – bruit) ou pour donner un aspect décoratif.

Ce bulletin donne toute une série de précisions sur les caractéristiques et les avantages des revêtements en béton bicouche et fournit des recommandations pour la composition et la mise en œuvre du béton. Différentes applications de routes et autoroutes seront passées en revue – à la fois pour les structures en béton de dalle et en béton armé continu – ainsi que des revêtements en béton esthétique, destinés aux espaces publics et zones urbaines, tant anciens que récents. Ces analyses permettront de mettre en lumière les critères déterminants dans le choix de structure bicouche.

1. UN PEU D'HISTOIRE

LE PLUS ANCIEN REVÊTEMENT EN BÉTON DU MONDE

La ville de Bellefontaine, dans l'État américain de l'Ohio, possède la plus ancienne route en béton du monde, à savoir Court Avenue. C'est grâce à George Bartholomew, un expert du ciment et du béton et fondateur de sa propre entreprise de ciment « Buckeye Portland Cement Co. ». En 1891, Bartholomew proposa au conseil municipal de construire les rues devant l'administration communale en béton. L'administration de la ville fut d'abord sceptique car nulle part ailleurs le béton n'avait encore été utilisé pour la construction de chaussées. Dans un premier temps, ils lui permirent tout de même de commencer une section test. Celle-ci résista et deux ans plus tard, le conseil donna son autorisation pour commencer les travaux. L'administration étant toujours méfiante, Bartholomew dû fournir le ciment lui-même et paya le montant de 5.000 dollars en garantie d'une durée de vie de minimum cinq ans. Le montant global des travaux s'éleva à 9.000 dollars.

Faisant preuve de sagacité, Bartholomew se tournait vers l'avenir. Il prit l'initiative de proposer un revêtement bicouche. La couche inférieure, d'une épaisseur d'environ 10 cm, a été construite avec de gros granulats jusqu'à 36 mm avec un rapport eau sur ciment de 0,60. La couche de roulement était, elle, constituée de petits granulats de 12 mm avec un rapport E/C de 0,45. La résistance à la compression du béton était de 35 MPa. Le béton bicouche avait pour but d'incorporer, dans la couche supérieure, des granulats durs pouvant supporter les roues des chariots et sabots des chevaux.

Résultat? La route en béton a très bien résisté jusqu'ici. Ce fut donc une belle affaire pour cette initiative de George Bartholomew, qui récupéra sa garantie en 1898 sans équivoque. Les 50 premières années de vie du revêtement, l'entretien n'a coûté que 1.400 dollars. Certaines réparations ont été effectuées au cours des dernières décennies. D'ailleurs, aujourd'hui encore, le béton de Court Avenue est toujours en place.

Le procédé de mise en œuvre de béton bicouche composé de granit dur dans la couche supérieure a été breveté à Chicago en 1906 sous le nom de « Granitoid Concrete Streets » et a été appliqué dans plusieurs états américains.



Plaque commémorative à Bellefontaine, Ohio, États-Unis

QUELQUES DÉCENNIES PLUS TARD EN EUROPE

Ce n'est qu'entre les deux guerres mondiales du XXe siècle, entre 1920 et 1930, que la structure de béton bicouche a aussi été utilisée en Europe. En Allemagne, il existait un système dont la couche inférieure était composée d'un béton maigre d'environ 20 cm d'épaisseur ; la couche supérieure de 5 à 6 cm d'épaisseur était, quant à elle, appliquée « frais sur frais » avec un béton riche à teneur en ciment minimale de 350 kg/m³.

En Belgique aussi, le béton bicouche existait à cette époque ! En témoignent les extraits suivants de la publication « Béton de Ciment Portland Artificiel. Allées de jardins, Chemins d'Accès et Trottoirs », publié en 1930 par nos prédécesseurs du « Groupement Professionnel des Fabricants de Ciment Portland artificiel de Belgique ».

REVÊTEMENTS EXÉCUTÉS EN DEUX COUCHES DE BÉTON

La couche inférieure, *couche de résistance*, est plus épaisse que la couche supérieure, *couche d'usure*. Cette dernière est exécutée avec un béton de petites pierrailles, à dosage très riche en ciment (voir tableau pp. 20 et 21), en vue d'obtenir un meilleur fini de la surface et une haute résistance du béton.

La couche supérieure est posée immédiatement après que la couche inférieure est exécutée à l'épaisseur voulue et avant que la prise de cette couche inférieure ne commence. Le lissage de la surface ne se fait évidemment que pour la couche supérieure.

L'épaisseur de la couche supérieure est de 5 cm. environ. Elle peut être réduite à 3 cm. lorsqu'il s'agit de trottoirs pour piétons.

Le revêtement en deux couches de béton peut être exécuté suivant les mêmes profils que ceux indiqués pour les revêtements en une seule couche. Il est un peu moins coûteux que le béton posé en une couche.

EXÉCUTION DES REVÊTEMENTS EN DEUX COUCHES

10. — On procède d'une façon identique à celle qui vient d'être décrite. Il faut avoir soin de placer la couche supérieure sur la couche de fondation avant que celle-ci n'ait fait prise. Chaque couche est damée séparément. Les opérations du régalaie définitif et du finissage n'ont évidemment lieu que pour la couche supérieure d'usure. Cette exécution donne une dalle comprenant dans son épaisseur deux bétons de dosages différents.

PROTECTION DU BÉTON APRÈS SON ACHÈVEMENT

11. — Le béton fraîchement placé, damé et lissé, doit avant tout être protégé contre la dessiccation. Il faut donc le mettre à l'abri des ardeurs du soleil et de l'action du vent.

Sans cette précaution la surface se dessèche trop rapidement, se craquèle et se couvre de nombreuses petites fissures peu profondes mais d'aspect désagréable.

Aussi, par temps chaud, ensoleillé, convient-il de tendre au-dessus du revêtement, de la toile ou de la paille, ou de le protéger avec des planches jusqu'à ce que la prise soit effectuée (vingt-quatre heures environ).

Extraits de la publication belge de 1930

LE DÉVELOPPEMENT DU BÉTON LAVÉ EN BELGIQUE ET EN EUROPE

Entre 1978 et 1982, la technologie du béton désactivé chimiquement à usage routier a été développée en Belgique. C'est un partenariat entre les entrepreneurs, l'industrie du porphyre, le Centre de Recherche pour l'Industrie Cimentière (CRIC), le Centre de Recherches Routières (CRR) et l'administration des routes, subventionné par l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (IRSIA). Dans l'esprit de collaboration, le CRIC a réussi à affiner la composition du retardateur de prise. La société ROBUCO, elle, a mis au point un système permettant de dérouler un film protecteur en polyéthylène. Quelques courts tronçons d'essai ont été réalisés, suivis par des projets plus importants d'un total de 100 000 m² entre 1980 et 1982.

Les résultats furent positifs. Il s'est avéré possible d'obtenir une répartition homogène des granulats en surface ; la planéité n'a pas été affectée ; le bruit de roulement était inférieur à celui des autres revêtements de surface des routes en béton et comparable à celui des chaussées bitumineuses à gros granulats. La protection avec un film plastique constituait également un avantage important, car le béton pouvait faire sa prise de manière optimale, même dans des conditions météorologiques moins favorables. Le succès de la technique du « béton lavé » est confirmé par le simple fait qu'elle est toujours utilisée massivement 40 ans plus tard.



Malgré l'amélioration, le niveau sonore atteint n'était néanmoins pas satisfaisant. Du fait que de gros granulats étaient utilisés dans la composition du béton, ils remontaient forcément en surface lors de la vibration du béton. Or, pour obtenir une surface peu bruyante, il faut plutôt de petits granulats. Les experts autrichiens l'ont bien compris et ont adapté le concept à une version bicouche. Dans la couche supérieure, des granulats de petite taille de granulométrie maximale de 8 ou 11 mm furent utilisés. Dirigée par le Dr Hermann Sommer, directeur de l'Institut de Recherche de l'Industrie cimentière autrichienne, cette nouvelle technologie a été étudiée et adaptée dès le début des années 90. Le concept a ensuite été adopté dans plusieurs pays européens : Allemagne, Belgique, République tchèque, Pologne. En Autriche et en Allemagne, le béton lavé bicouche est aujourd'hui appliqué de manière standard pour les autoroutes en béton.



Le procédé du dénudage « chimique » d'une surface en béton : pulvérisation du retardateur de prise sur le béton frais – protection par une feuille en plastique – élimination de la couche superficielle de mortier par une brosse mécanique



2. COMMENT ET POURQUOI PRESCRIRE UN REVÊTEMENT EN BÉTON BICOUCHE ?

Un revêtement en béton bicouche se compose d'une couche inférieure et d'une couche supérieure (également appelée couche de roulement). La mise en œuvre se fait en deux phases où le béton frais de la couche supérieure est coulé sur le béton frais, non durci, de la couche inférieure. Le délai entre la pose des deux couches doit donc être limité à 30 minutes minimum et 1 heure maximum de manière à obtenir un mélange parfait entre les deux couches. Le résultat après durcissement donne un revêtement de béton monolithe où les deux couches adhèrent entièrement l'une à l'autre. La couche inférieure est généralement la plus épaisse (15 à 23 cm), tandis que la couche supérieure est généralement limitée en épaisseur (4 à 10 cm). Si elle est posée correctement, aucune limite n'est visible entre la sous-couche et la couche supérieure.

En principe, différentes compositions de béton sont appliquées pour les couches supérieure et inférieure. La couche supérieure contient des matériaux de haute qualité et/ou coûteux tels que des granulats résistant à l'usure ou colorés et des pigments de couleur. Des matériaux de qualité inférieure peuvent alors être utilisés dans la couche inférieure, typiquement ceux qui ne répondent pas aux exigences de surface d'un revêtement routier, comme la rugosité. Ainsi des matériaux tels que des granulats artificiels ou des granulats de béton recyclé peuvent être utilisés.

Dans certains cas, la même composition de béton peut être utilisée pour les couches supérieure et inférieure. C'est alors la méthode de finition et de compactage qui diffère, par exemple vibrer la couche inférieure et lisser la couche supérieure sans vibration.

Les avantages des chaussées en béton bicouche sont mesurables dans la qualité de la surface de roulement mais également du point de vue économique et écologique.

En termes de qualité de surface, les caractéristiques suivantes peuvent être mises en lumière :

- la planéité, qui assure un bon confort de conduite. Cette caractéristique est plus facile à obtenir en béton bicouche, car la couche supérieure est moins épaisse et uniquement lissée, ce qui est plus facile à réaliser que sur toute l'épaisseur d'un béton monocouche ;
- l'adhérence, qui garantit une distance de freinage limitée et donc la sécurité de l'utilisateur de la route. L'utilisation, dans le mélange de béton, de granulats de qualité, insensibles au polissage, est déterminante ;
- l'aspect silencieux de la surface : le faible bruit de roulement causé par l'interaction entre les pneus et le revêtement de la route. La présence de granulats de petite taille et uniformes, répartis de manière homogène sur la surface est essentiel ;
- aspects esthétiques tels que couleur, texture, motifs incorporés... Un large éventail d'aspects possibles est ainsi disponible ;
- la couleur claire de la surface et son albédo (réflexion de la lumière) correspondant créent ainsi une surface plus fraîche. De plus, la réflexion des rayons du soleil aide à diminuer les effets du réchauffement climatique ;
- des propriétés spéciales telles que la purification de l'air à l'aide de surfaces photocatalytiques permettant d'éliminer les gaz d'azote dans l'air ;
- la durabilité et la résistance à l'usure de la surface. Prenons l'exemple, déjà cité, du premier revêtement en béton à Bellefontaine (USA). Les pierres les plus dures avaient été sélectionnées et introduites dans la composition de la couche supérieure, dans le but de résister à la charge du trafic de l'époque: chevaux et voitures. Aujourd'hui, le concept de durabilité s'est élargi et se traduit, entre autres, par une résistance élevée à l'écaillage sous l'influence des cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.



(© Roosgroep)

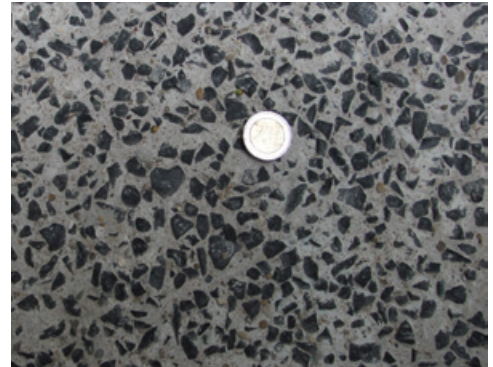
L'avantage économique évident par rapport à la mise en œuvre d'un béton monocouche, est le fait que les matériaux coûteux peuvent être utilisés uniquement en couche supérieure et donc sur une épaisseur limitée. La couche inférieure peut alors contenir des matériaux moins nobles. Cela étant, il arrive que la mise en œuvre d'un revêtement en béton bicouche soit finalement plus coûteuse en raison d'une logistique plus importante, due à la nécessité de deux machines et deux centrales à béton. Cependant, si le volume est suffisamment élevé, l'utilisation de matériaux moins coûteux pour la couche supérieure peut compenser ce surcoût dans de nombreux cas.

Pour le bénéfice de l'environnement et de l'économie circulaire, des matériaux de recyclage peuvent être utilisés dans la couche inférieure, de préférence des granulats de béton de haute qualité provenant d'infrastructures routières vétustes. Comme déjà mentionné, il est également possible d'appliquer, en couche supérieure, certaines technologies respectueuses de l'environnement, par exemple les surfaces à effet dépolluant.



3. APPLICATIONS POUR SURFACES EN BÉTON ESTHÉTIQUE ET COMPOSITIONS SPÉCIALES

Pour la conception de rues et d'espaces publics qualitatifs ou décoratifs, le béton coloré et/ou dénudé est souvent utilisé. Le grand avantage est que l'aspect esthétique est combiné à une bonne résistance au trafic lourd. L'aspect du béton dénudé (coloré) est déterminé par les pierres qui apparaissent en surface en combinaison avec la partie visible du mortier. Le mortier peut être simplement de couleur béton gris ou il peut être coloré en ajoutant au mélange, des pigments colorants. En vue d'obtenir encore plus de variations, il est aussi possible d'utiliser des pierres de couleur. La combinaison de pierres et de mortier peut être homogène ou contrastée, au goût de l'auteur de projet.



Surfaces en béton délavé
Gauche : homogène
Droite : contrasté

En matière de rendu esthétique, il est possible de porter son choix sur des matériaux plus chers. Pour obtenir des variantes, l'auteur de projet peut varier, par exemple, le type des pierres, de colorant ou encore l'utilisation de ciment blanc. Dans ces cas de figure, la technique du béton bicouche peut être une piste intéressante pour rendre le coût du projet abordable. En effet, les matières premières coûteuses ne sont alors utilisées que dans la couche de revêtement plus mince. Ci-dessous, une présentation succincte de quelques projets dans lesquels la technologie bicouche a été appliquée pour la réalisation de revêtements en béton esthétique.

PROJET 1 - ROND-POINT EN FORME D'ÉTOILE À SCHERPENHEUVEL

En 1996, un rond-point a été construit à Scherpenheuvel en face de la Basilique. Faisant référence à la symbolique de ce lieu de pèlerinage, le rond-point a été construit en forme d'étoile à sept branches, à l'image du plan de la ville et à la forme de la Basilique elle-même.

Deux couleurs ont été choisies : noir et vert. Ces couleurs ont également été utilisées pour le pavage adjacent en pavés de béton. En raison de sa forme complexe, le béton a été coulé manuellement entre coffrages fixes et a été pourvu d'une armature centrale en treillis. Le béton a été appliqué en deux couches : une sous-couche de béton gris et une couche supérieure de béton coloré.



Coffrage en bois et armature en treillis



Compactage de la couche inférieure en béton gris à l'aide d'aiguilles vibrantes



Épandage du béton de couleur verte destiné à la couche supérieure



Résultat du revêtement de béton vert dénudé, par rapport à un pavé de béton vert similaire.

PROJET 2 – SINT-JANSPLEIN À ANVERS

En 2000, la « Sint-Jansplein » à Anvers a bénéficié d'un relooking complet : un revêtement en béton ocre (8950 m²) combiné avec un béton noir (760 m²). Pour les deux surfaces colorées, le résultat est obtenu à l'aide de pierres fines de couleur (jaune : « Lamonrville » - noir : « Jasberg »), soutenues par un mortier respectivement ocre et noir. Le revêtement a été construit à l'aide d'une machine à coffrage glissant qui a coulé une sous-couche de 18 cm en béton gris classique ainsi qu'une couche supérieure de 7 cm en béton de couleur ocre. Les dalles ont été renforcées d'un treillis d'armature diam. 10 mm x diam. 10 mm x 10 mm x 150 mm x 150 mm.

Quelques caractéristiques des compositions des bétons (essais effectués par le CRIC) :

Sous-couche :

- Caractéristiques et critères de conception

- Béton gris

Teneur minimale en ciment de 375 kg/m³

- Rapport E/C maximum 0,45
- Sans entraîneur d'air (teneur en air environ 1 %)

- Résultats d'essais obtenus

- Résistance à la compression sur carottes après 91 jours > 80 MPa

Couches supérieures :

- Caractéristiques et critères de conception

- Colorants: hydroxyde de fer jaune pour le béton jaune, dioxyde de manganèse noir pour le béton noir
- D_{max} 8 mm

Teneur minimale en ciment de 425 kg/m³

- Rapport E/C maximum 0,45
- Avec entraîneur d'air (teneur en air ≥ 5 %)

- Résultats d'essais obtenus

- Résultats résistance à la compression sur carottes après 91 jours > 50 MPa
- Résultats absorption d'eau par immersion sur carottes < 5,9 %.

Résultats de la perte de masse due à l'écaillage après 30 cycles < 3,6 g/dm² (essai de gel-dégel ISO/DIS 4846.2)



Mise en place du treillis d'armature dans la sous-couche



Coffrage pour le coulage manuel du béton noir autour des avaloirs



Bétonnage de la sous-couche (gauche) ...



... et de la couche supérieure (droite)



Le « supersmoother » lisse les irrégularités de la couche supérieure dans le béton fraîchement coulé



Le retardateur de prise est alors pulvérisé à la surface du béton frais



Après environ une journée, la feuille de plastique est enlevée



La surface est alors lavée au moyen d'un nettoyeur à haute pression



Le résultat de la surface dénudée, la profondeur de la texture de surface est d'environ 1 mm, avec de fins granulats jaunes englobés dans un mortier ocre



La combinaison du béton jaune et noir

PROJET 3 - PARVIS DU CASINO DE DINANT

La place en face du casino de Dinant a également été réalisée en 2000. Il s'agit d'une combinaison d'un béton brun avec un béton blanc, tous les deux dénudés. La séparation entre les deux types de béton est matérialisée par un élément linéaire en pierre naturelle. Pour le béton blanc désactivé, la mise en œuvre d'un béton bicouche a été préconisée, ce qui est visible de par la présence d'un mélange de mortier blanc et petits granulats blancs.

Le béton gris pour la sous-couche a été produit dans une centrale à béton et alimenté par camions-malaxeurs tandis que la composition spéciale du béton blanc a été réalisée sur chantier. De cette façon, toute contamination du béton blanc pendant la construction ou le transport a pu être évitée. Cela a été rendu possible au vu des quantités relativement faibles pour la couche supérieure. Pour cette couche supérieure, des granulats blancs ont été utilisés en combinaison avec du ciment blanc et du colorant (2 % de dioxyde de titane ou TiO_2). Ce projet est une belle illustration de l'utilisation d'une couche supérieure onéreuse en combinaison avec une sous-couche économique.



PROJET 4 - PLACE JEAN JAURÈS À HERSTAL

La construction de la place Jean Jaurès à Herstal remonte à 2011. L'intention était de donner au trottoir un aspect identique à celui des murs adjacents – en béton préfabriqué et à structure calcaire très dense. Afin d'obtenir un nombre relativement important de gros granulats amassés en surface, la technique dite « française » a été utilisée (appelée ainsi du fait de la haute fréquence de son utilisation en France).

Il s'agit d'un mélange de béton discontinu qui ne contient presque pas de granulats de calibre 4 à 6 mm mais seulement des granulats de 6 à 12 mm. Lorsqu'un tel béton est coulé et compacté de manière classique par vibration interne, il y a un risque que les pierres s'enfoncent. Après lavage, la surface a alors un aspect hétérogène aux granulats parsemés. Pour cette raison, il n'est pas recommandé de compacter le béton de façon conventionnelle pour ce type d'aspect avec une densité élevée des granulats de même calibre en surface.

La solution consiste à travailler en béton bicouche, éventuellement avec exactement la même composition de béton que celle utilisée pour les murs préfabriqués. La couche inférieure est alors compactée de manière classique avec l'aiguille vibrante. La couche supérieure, elle, est coulée « frais sur frais » et simplement lissée à la latte, de sorte que les pierres restent à la surface de manière horizontale.

Le revêtement de la place Jean Jaurès est constitué de dalles armées et a été réalisé entre coffrages fixes. La même composition de béton à base de calcaire a été utilisée pour la sous-couche et la couche supérieure.

Le résultat est une surface à haute densité de granulats.



De gauche à droite : coulage et compactage de la sous-couche – mise à niveau – lissage – pulvérisation du retardateur de prise
Grande photo : la surface finie après dénudage

4. COMPOSITIONS SPÉCIALES POUR LA COUCHE SUPÉRIEURE

En plus de l'aspect esthétique, d'autres fonctions peuvent être attribuées à la couche supérieure. C'est le cas, par exemple, des chaussées en béton à effet dépolluant dans lesquelles des matériaux photocatalytiques sont incorporés dans le béton de la couche supérieure. Il s'agit du dioxyde de titane (TiO_2), cette fois-ci non pas dans une fonction de coloration, mais comme catalyseur dans une réaction d'oxydation photocatalytique. Celui-ci est activé sous l'influence de la lumière du soleil et fait en sorte que les particules nocives dues aux émissions dans l'air, c'est-à-dire les oxydes d'azote (NOx : NO et NO_2), soient transformés en nitrate (NO_3), qui est ensuite emporté par la pluie.

En Belgique, cette technologie a été appliquée en 2011 dans deux projets pilotes suivis par le Centre de Recherches Routières (CRR), où du béton bicouche a été posé sur les sites industriels « Den Hoek 3 » à Wijnegem et « Duwyckpark » à Lier. Dans la couche supérieure (épaisseur 50 mm), un ciment avec 4 % de TiO_2 a été mis en œuvre. A Wijnegem, la surface est un béton lavé, à Lier, le béton a été brossé pour obtenir un ciment plus actif en surface. La sous-couche (épaisseur 180 mm), composée de granulats de béton recyclés à raison de 57 % des gros granulats, a donc également été conçue dans le respect des critères environnementaux.



Mise en œuvre de la couche supérieure blanche composée de dioxyde de titane du revêtement bicouche à Wijnegem



Vue sur la chaussée finie avec du béton brossé à Lier (© CRR)

5. APPLICATION POUR LES REVÊTEMENTS ROUTIERS SILENCIEUX

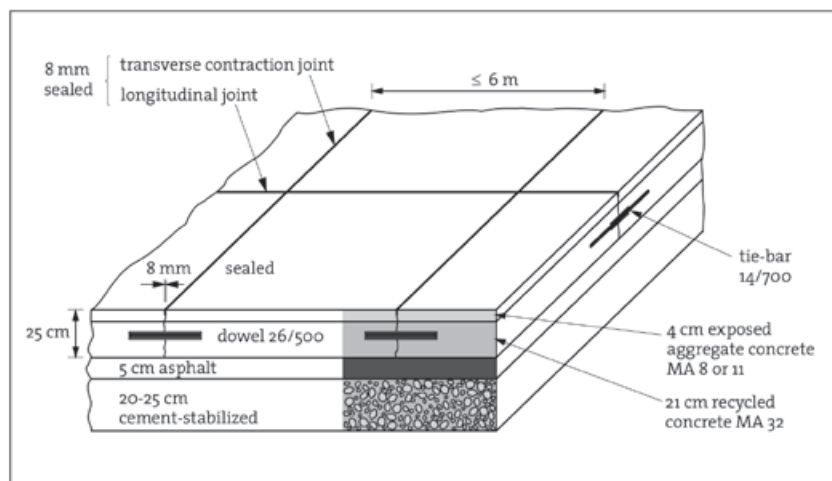
Un des avantages premiers de la construction bicouche d'un revêtement en béton est la possibilité d'optimiser la texture de la surface en matière de rugosité, de planéité et de bruit de roulement grâce à une composition adaptée de la couche supérieure. En particulier l'effet de réduction du bruit du trafic a permis aux revêtements en béton bicouche de gagner du terrain en Europe au cours des trois dernières décennies. Les revêtements routiers silencieux à structure dense (non poreuse) sont caractérisés par la présence de petits granulats en surface. Ces granulats doivent être distribués en surface de manière dense et aléatoire (non ordonnés périodiquement) mais homogène. Pour ce faire, il suffit d'incorporer exclusivement des petits granulats ($D_{\max} \leq 10$ mm ou même 6,3 mm) dans la composition de béton de la couche supérieure.

DALLES DE BÉTON BICOUCHES

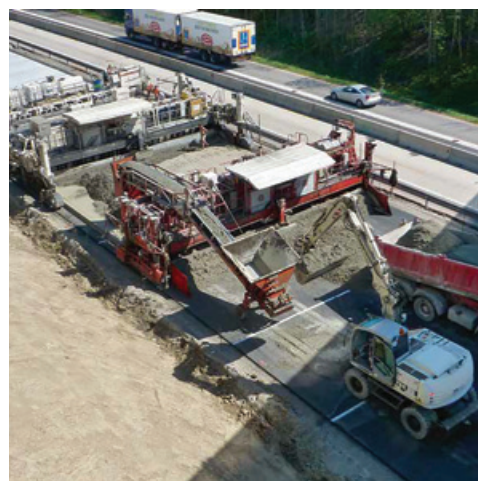
AUTRICHE

En 1990, l'Autriche, pays à la longue tradition de revêtements en béton, a été confrontée à deux défis : d'une part, à la rénovation d'un certain nombre d'anciennes autoroutes en béton existantes et d'autre part, au problème de bruit de roulement trop élevé. La solution proposée fut la technique du béton dénudé bicouche. Le concept, aussi appelé béton lavé, a été directement transposé du système belge, mais la réduction de la taille des granulats jusqu'à 8 ou 11 mm a permis de réduire drastiquement le bruit de roulement. De plus, le béton des anciennes autoroutes a été réutilisé dans la sous-couche de la nouvelle construction. Pour ce faire, le béton démolé a été transformé dans une installation de concassage et de criblage en un nouveau granulats concassé de différentes fractions. La fraction 4/32 fut utilisée dans le béton riche de la sous-couche ; la fraction 0/4 dans la fondation liée au ciment.

La section transversale type d'une autoroute autrichienne ainsi que le concept de recyclage sont présentés ci-dessous :

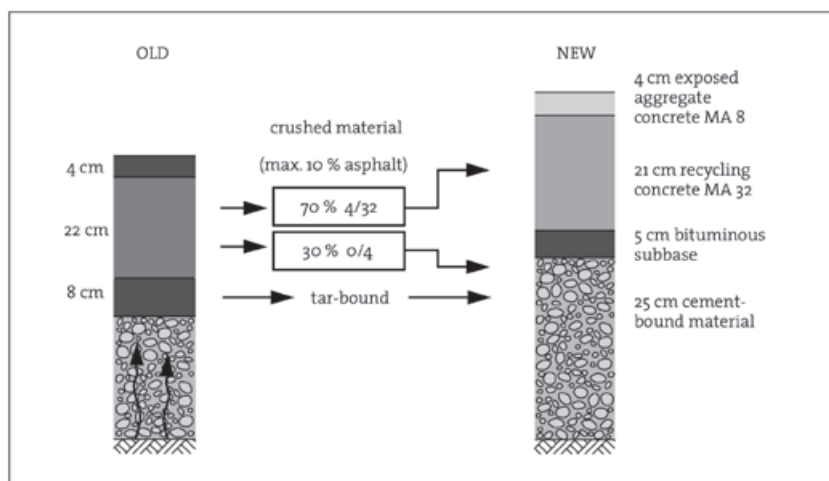


Coup type d'une autoroute autrichienne depuis 1990



Autriche : chantier de mise en œuvre d'un revêtement bicouche (© Smart Minerals GmbH)

Notez également la présence d'une couche d'asphalte entre la fondation à liant hydraulique et le revêtement en béton, ce qui est similaire au concept belge contemporain des routes en dalle de béton ou en béton armé continu destinées au trafic lourd. En Autriche, la raison initiale de ce choix était de permettre la circulation temporaire de la route afin que les éventuels tassements dans les zones montagneuses puissent encore avoir lieu avant la pose du béton. Plus tard, cette couche a également rempli le rôle de protection de la fondation. En outre, nous savons aujourd'hui qu'elle apporte une contribution positive et importante au comportement à long terme du revêtement.



Concept de reconstruction et de recyclage des anciennes autoroutes en Autriche

Souvent, l'ancienne fondation en asphalte était également incorporée (stabilisée et immobilisée) dans la nouvelle fondation en ciment, et dans certains cas en utilisant des ciments spéciaux.

Les premières expériences autrichiennes se sont avérées fructueuses sur le plan technique et économique. Entre 1990 et 2000, environ 240 km de routes ont ainsi été réfectés.

ALLEMAGNE

En Allemagne, l'exemple autrichien a été rapidement suivi : la finition de surface historiquement réalisée avec de la toile de jute a été remplacée par du béton lavé bicouche. Comme en Autriche, la technologie bicouche est aujourd'hui devenue la norme. Outre la réduction du bruit, un autre avantage a été constaté : la préservation de la qualité des goujons lors de leur insertion mécanique dans le béton frais. En Allemagne, l'utilisation de berceaux métalliques n'est pas autorisée sur les autoroutes car la position correcte des goujons est mieux assurée lorsqu'ils sont insérés mécaniquement. Cependant, un autre problème a été décelé dans la version monocouche : la présence de cavités d'air au-dessus des goujons, ce qui a entraîné des fissures de réflexion en surface. La technique de mise en œuvre « frais sur frais » de la couche supérieure facilite le remplissage des cavités et évite ces problèmes. Cela permet également, dans le cas du béton monocouche, d'éviter toute irrégularité au-dessus des goujons vibrés.

Même si la texture de surface n'est pas un béton dénudé, il peut être tout de même intéressant de travailler en béton bicouche. En effet, une composition de béton de moindre qualité dans la sous-couche peut, dans certains cas, permettre une économie d'argent sur le projet.

Le tableau ci-après donne un exemple de calcul pour un projet spécifique allemand. Toutefois, cela ne tient pas compte des coûts de mise en œuvre plus élevés, par exemple en raison de la production de deux mélanges de béton et donc deux machines.

Projet d'autoroute – 10 km de long – 2 directions de circulation – 14,5 m de largeur par direction de circulation – épaisseur totale 30 cm – épaisseur de la sous-couche 23 cm – épaisseur de la couche supérieure 7 cm

	Monocouche	Bicouche
Quantité de béton en sous-couche (m³)	66 700	66 700
Quantité de béton en couche supérieure (m³)	20 300	20 300
Quantité totale de béton (m³)	87 000	87 000
Prix au m³ du béton en sous-couche	85,00 €	70,00 €
Prix au m³ du béton en couche supérieure	85,00 €	85,00 €
Coût béton en sous-couche	5 669 500,00 €	4 669 000,00 €
Coût béton en couche supérieure	1 725 500,00 €	1 725 500,00 €
Coût total béton	7 395 000,00 €	6 394 500,00 €
Réduction de coût	1 000 500,00 €	

Comparaison du coût des matériaux entre la conception monocouche et la conception bicouche en Allemagne

REPUBLIQUE TCHEQUE - POLOGNE - ...

Les mêmes évolutions de la technique du béton bicouche ont été adoptées dans d'autres pays d'Europe centrale, dont la République tchèque et la Pologne. En Pologne, 650 km d'autoroutes et de routes principales ont déjà été construites en béton ces dernières années et 800 km supplémentaires sont prévus d'ici 2025.

ÉTATS-UNIS

Aux États-Unis, le béton bicouche a été utilisé entre 1950 et 1970 pour la construction de dalles en béton armé dans plusieurs états (Illinois, Iowa, Wisconsin, Michigan, ...). L'objectif initial était de pouvoir placer manuellement les treillis d'armature entre les joints transversaux sur la couche inférieure encore non durcie. La même composition de béton était alors utilisée pour la couche supérieure et la couche inférieure. Par la suite, étant passé à un béton de dalles non armé, le béton bicouche n'était alors plus nécessaire.

Au cours des années 1970 et 2004, 5 sections de route expérimentales ont été construites avec du béton bicouche, principalement dans l'intérêt d'utiliser une composition de béton de qualité différente dans les deux couches.

Quelques caractéristiques des différents projets :

- Utilisation de béton de différentes résistances dans les couches supérieures et inférieures ;
- Utilisation de granulats naturels locaux de qualité inférieure (non résistants au polissage, coefficient de dilatation thermique plus élevé) dans la couche inférieure ;
- Utilisation d'une fraction d'asphalte recyclé dans la couche inférieure, par exemple provenant de la démolition d'une chaussée composite (béton + couche supérieure d'asphalte).

En 2006, une délégation américaine a effectué un voyage d'étude en Europe (AT, DE, BE, NL) sur le thème des "Chaussées en béton à longue durée de vie". Les conclusions de cette visite ont encouragé les Américains à continuer à utiliser des chaussées en béton bicouche. Avec l'aide d'experts autrichiens, un projet d'étude a été mis en place au Kansas, c'est-à-dire un revêtement bicouche avec une surface dénudée composée de petits granulats.

En 2014 et 2017, trois autres projets d'étude ont été menés avec succès au Tennessee, en Californie et au Texas.

Un projet remarquable, réalisé de 2013 à 2016, est celui de l'élargissement et de la reconstruction de la route à péage I-90, sur 124 km, au nord-ouest de Chicago (Illinois) en direction du Wisconsin.

La structure choisie est un revêtement en dalles de béton bicouche goudonnées. L'épaisseur totale du revêtement en béton est de 33 cm.

Des efforts particuliers ont été faits eu regard de l'impact environnemental du projet. La couche inférieure contient jusqu'à 50 % de granulats de béton recyclé et/ou de granulats d'asphalte recyclé (« *FRAP = Fractionated Recycled Asphalt Pavement* »). Une autre particularité est que la couche inférieure a été mise en œuvre sans compactage additionnel, ce qui peut impliquer le risque de perte de qualité. Ce choix s'explique par le système fiscal en vigueur, qui prévoit un paiement supplémentaire en cas d'utilisation d'une deuxième machine de compactage. Pour la couche supérieure, cependant, une machine à coffrage glissant classique a été utilisée. La finition de surface était un fin striage dans le sens longitudinal.



U.S. Route à péage I-90 : approvisionnement du béton pour la couche de roulement à l'aide d'un tapis roulant et finition de surface par striage fin dans le sens longitudinal



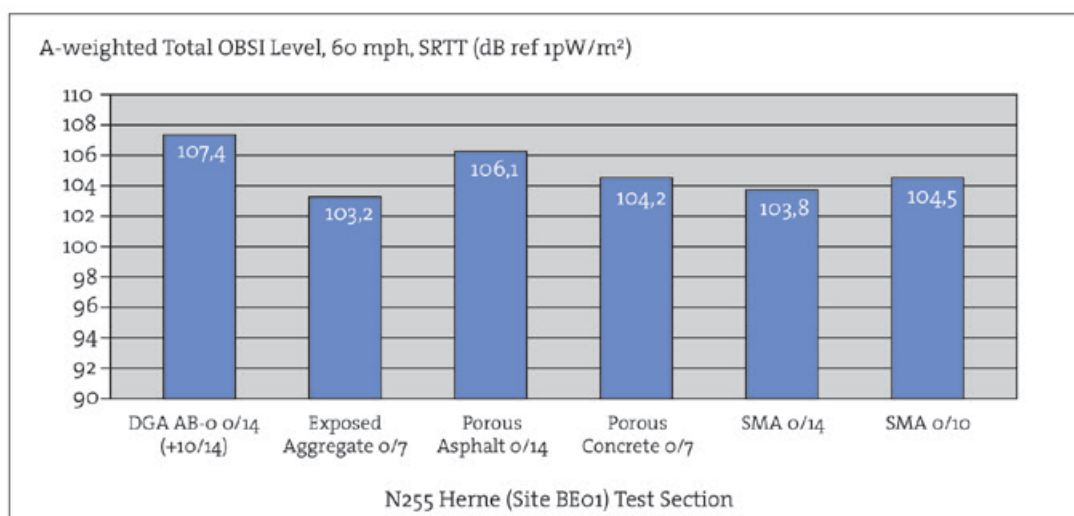
BÉTON ARMÉ CONTINU BICOUCHE

Avec certains États américains, la Belgique est sans aucun doute l'une des pionnières dans le domaine du béton armé continu pour la construction de routes. Il n'est donc pas surprenant que la plupart des applications de béton armé continu bicouche se trouvent également chez nous. Ci-dessous, un aperçu des différents projets pour la période 1996 - 2019, accompagné d'une brève discussion.

HERNE, N255, 1996

En 1996, une série de revêtements routiers silencieux ont été construits à Herne sur la route régionale N255. En couche supérieure d'un béton bicouche, différentes compositions et matériaux ont été testés : béton lavé à fins granulats, béton poreux, béton bitumineux dense, SMA et asphalte poreux ont chacun été appliqués sur une couche inférieure de 18 cm d'épaisseur de béton armé continu. Le béton lavé était basé sur l'expérience autrichienne de l'époque. Ces sections d'essai ont été soumises à de nombreuses mesures et évaluations immédiatement après la construction et après trois ans (1999). Après la seconde mesure, une augmentation du bruit de 2,5 dB(A) a été observée à la fois pour l'asphalte poreux et pour le béton poreux, ayant initialement obtenu les meilleurs résultats. A l'époque, l'asphalte dense et le béton lavé fin présentaient les niveaux de bruit les plus faibles.

En octobre 2007, 11 ans après la construction, une nouvelle série de mesures a été réalisée par une équipe américaine avec une autre méthode de mesure : la méthode OBSI (« *On Board Sound Intensity* »). Les résultats sont présentés dans la figure ci-après. Du fait de la dégradation du béton bitumineux dense, il est actuellement le plus bruyant. Les autres surfaces ont, elles, maintenu leurs niveaux de 1999.

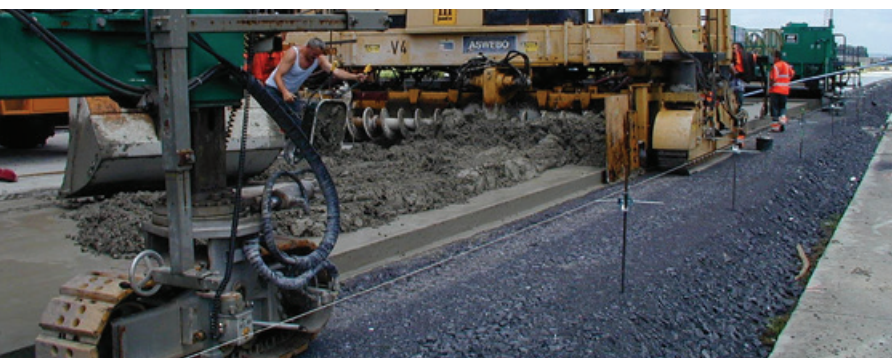


Avec une durée de vie de plus de 23 ans, la section de route en béton fin lavé est toujours en excellent état et constitue donc le meilleur choix pour un revêtement silencieux et durable. Soit dit en passant, en 2010, toutes les sections d'essai, à l'exception du béton fin lavé, ont été recouvertes d'une couche bitumineuse.

ESTAIMPUIS, N511, 2002

Sur la N511 à Estaimpuis entre Dottignies (Mouscron) et Wattrelos (FR), un tronçon de route a été renouvelé en 2002 sur une distance de 1250 m. Quatre sections d'essai en béton armé bicouche ont alors été réalisées. Pour l'ensemble des sections, l'épaisseur totale est de 20 cm. En revanche, pour chacune d'entre elles, le D_{max} des granulats de la couche supérieure varie – voir les données dans le tableau ci-dessous.

Nr section d'essais	Couche inférieure		Couche supérieure	
	Epaisseur	D _{max} (mm)	Epaisseur	D _{max} (mm)
1	15 cm	32	5 cm	7
2	14 cm	32	6 cm	10
3	12 cm	32	8 cm	14
4	12 cm	32	8 cm	20



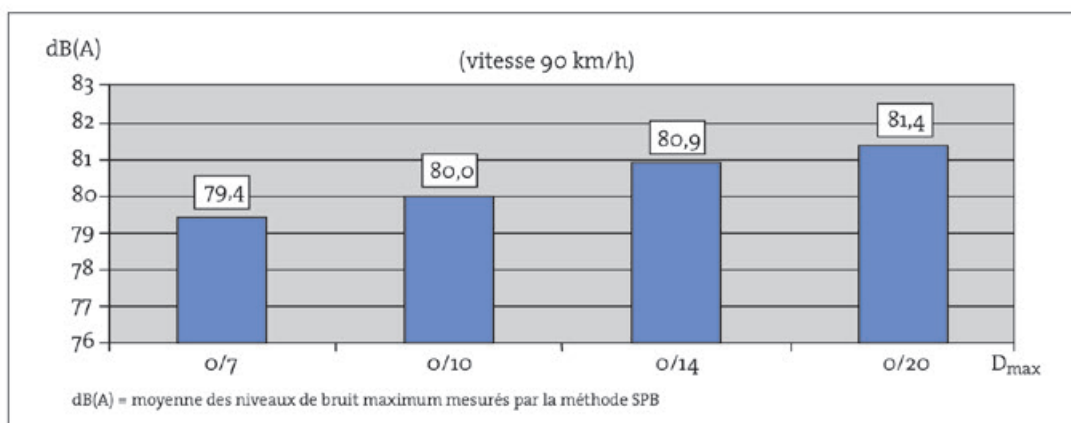
Estaimpuis : mise en œuvre du béton armé continu bicouche à l'aide de deux machines à coffrage glissant

A la fin des travaux, des mesures de rugosité, de planéité et de bruit ont été effectuées. Les exigences en matière de rugosité ont été facilement satisfaites : le coefficient de frottement transversal mesuré à l'odoliographe se situait toujours entre 60 et 70, c'est-à-dire bien au-dessus de la valeur minimale requise de 50.

Les résultats particulièrement bons en matière de planéité étaient également impressionnants. Le tableau ci-dessous montre les résultats du coefficient de planéité, mesuré avec l'APL (Analyseur de Profil en Long), équivalents à environ la moitié des valeurs maximales autorisées. Dans le cas d'un revêtement béton bicouche, la machine à coffrage glissant doit compacter et niveler une masse de béton plus faible pour la couche supérieure. En résulte une surface généralement très plane.

	Valeur maximale	Section 1 0/7	Section 2 0/10	Section 3 0/14	Section 4 0/20
CR moyen (2,5 m)	30	15,15	16,20	14,70	17,05
CR moyen (10 m)	70	33,30	31,40	28,95	41,05

En complément, des mesures de bruit ont été effectuées à l'aide de la méthode SPB (« *Statistical Pass-by* ») à des vitesses de 70 et 90 km/h. Le diagramme ci-dessous montre les résultats pour les différentes sections test à 90 km/h. Comme prévu, le bruit de roulement diminue avec la réduction du $D_{\max}$ du béton de la couche supérieure, engendrant un gain de 2 dB entre le plus grand (20 mm) et le plus petit (7 mm) $D_{\max}$.



Influence de la dimension maximale nominale des granulats $D_{\max}$ sur le bruit du trafic

Les résultats des mesures de rugosité et de planéité montrent que le revêtement offre un haut niveau de sécurité et de confort de conduite. Les bons résultats en termes de bruit sont liés au choix de la granulométrie de la couche supérieure mais sont certainement aussi influencés positivement par la planéité de la surface du béton armé continu.

ZWIJNDRECHT, N49/E34, 2007 et 2008

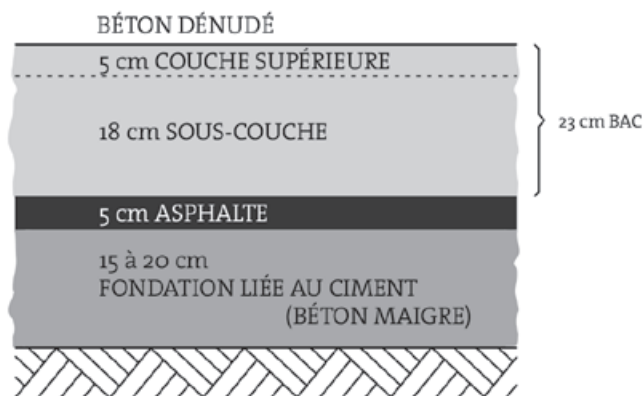
En 2007 et 2008, la voie rapide Anvers-Knokke a été reconstruite sur trois kilomètres près de Zwijsdrecht. L'ancienne dalle de béton a été remplacée par du béton armé continu avec une couche sandwich en asphalte tout en conservant la fondation existante en béton maigre. Stimulé par une conscience environnementale croissante et un sens de l'innovation, le gouvernement flamand a opté pour un projet pilote en béton armé continu bicouche et l'utilisation de granulats de béton recyclé dans la sous-couche.

Pour les armatures du béton armé continu (BAC), aucune différence n'a été faite avec le revêtement en béton monocouche de 23 cm d'épaisseur :

- armatures longitudinales : diam. 20 mm tous les 18 cm ;
- armatures transversales : diam. 16 mm tous les 70 cm, avec un angle de 60° ;
- recouvrement de l'armature longitudinale : 80 mm $\pm$ 10 mm ; cela signifie que les barres longitudinales se trouvent en haut dans la couche de béton inférieure.



Le béton de l'ancien revêtement démolé a été transformé en nouveaux granulats dans une centrale mobile de concassage et de criblage.



Nouvelle structure de la N49/E34 à Zwijndrecht

Les exigences suivantes ont été fixées pour les compositions de béton de la couche supérieure et de la couche inférieure :

- Couche supérieure :

- Granulats 4/6,3 avec critère de résistance au polissage $PSV \geq 50$, granulats recyclés non autorisés;
- Sable pour béton routier, sable de recyclage non autorisé;
- Ciment CEM III/A 42,5 N LA : minimum 425 kg/m^3 ;
- Rapport eau-ciment E/C $\leq 0,45$;
- Entraîneur d'air obligatoire, teneur en air du béton frais sur le chantier $\geq 5 \%$

- Sous-couche :

- Granulats concassés 4/6,3 – 6,3/20 – 20/32 dont jusqu'à 60 % peuvent être des granulats de béton recyclé issus de la dalle de béton concassée, divisés entre les fractions 6,3/20 et 20/32 ; et 40 % de granulats concassés naturels sans exigence de résistance au polissage. (Remarque : dans la deuxième phase, l'élimination complète des fractions 6,3/20 et 20/32 a été autorisée, quel que soit le pourcentage du mélange de grès);
- Sable pour béton routier, sable de recyclage non autorisé;
- Ciment CEM III/A 42,5 N LA : minimum 375 kg/m^3 ;
- Rapport eau-ciment E/C $\leq 0,45$;
- Entraîneur d'air obligatoire, teneur en air du béton frais sur le site $\geq 3 \%$

En termes de résistance et de durabilité, les exigences suivantes ont été fixées pour le béton durci (conformes au cahier des charges SB250 de l'époque, entre temps modifiées):

- Couche supérieure :

- Résistance à la compression : valeur caractéristique de 50 MPa sur des cubes de 15 cm de côté, stockés à $20 \pm 2 \text{ °C}$ conservés sous eau ou à 95 % H.R. et à un âge de 28 jours;
- Absorption d'eau par immersion : valeur moyenne maximale de 6,3% et valeur individuelle maximale de 6,8%.

- Sous-couche :

- Résistance à la compression : valeur caractéristique $\geq 52,5 \text{ MPa}$ mesurée sur des carottes prélevées dans le revêtement à un âge d'au moins 90 jours.

D'excellents résultats ont été obtenus en termes de planéité, de rugosité et de bruit de roulement.



Cependant, au bout d'environ quatre ans, des dégradations sont apparues sur le tronçon de route en direction de Knokke, à savoir une fragmentation du béton sur la voie de roulement, dans laquelle on a également constaté une concentration de fissures transversales. L'étude a révélé la présence de fissures horizontales dans la zone des dégâts au niveau du renforcement longitudinal du BAC. Il est également apparu clairement que les dégâts se sont produits au niveau des fissures primaires à grande ouverture du BAC (ce sont les fissures qui se produisent en premier, dans les premières semaines suivant la mise en œuvre). Ce type de dégradation a aussi été observé auparavant aux États-Unis mais c'était une première en Belgique.

Bien que l'on ne sache pas encore exactement quels sont les principaux paramètres à l'origine du développement des fissures horizontales, dans le cas de la N49/E34, on a supposé que l'utilisation de granulats recyclés a été le facteur décisif en raison d'un retrait plus important du béton routier. Le BAC a localement été réparé et recouvert d'une couche bitumineuse, après quoi la surface de la route a montré un comportement satisfaisant jusqu'à présent.

HERENTALS, A13/E313, 2012

Après les graves dégâts causés par l'hiver 2009/2010 sur l'asphalte ouvert de l'autoroute E313, il a été décidé de renouveler une partie de la surface du revêtement, de Herentals à Grobbendonk en direction d'Anvers, au niveau du BAC. Pour des raisons de bruit, un BAC bicouche a été choisi. Compte tenu des problèmes survenus sur la N49/E34 (voir ci-dessus), certaines adaptations ont été apportées aux spécifications techniques:

- Les granulats recyclés n'ont plus été autorisés pour la composition de la sous-couche, mais les exigences ont été adaptées afin que le calcaire puisse être utilisé (exigences adaptées pour le granulat concassé : LA25 ; PSVNR et MDE20 – voir aussi plus loin dans ce bulletin pour les exigences actuelles des cahiers des charges type).
- Aucun entraîneur d'air n'a été admis pour le béton de la couche inférieure. L'objectif a été d'atteindre la meilleure adhérence possible entre le béton et les armatures longitudinales (même si ce lien de cause à effet n'a pas été démontré par la recherche).

- L'armature longitudinale a été placée plus bas : la distance et la tolérance entre le nu supérieur de l'armature longitudinale et la surface du revêtement bicouche devaient être de 95 ± 10 mm. L'épaisseur de la couche supérieure étant de 50 mm, l'armature longitudinale se trouvait à 45 mm de la surface de la couche inférieure. Le but a donc été d'éviter la possibilité de vibration de l'armature pendant le compactage de la couche inférieure.
- La technique des amorces de fissuration a été introduite, c'est-à-dire la réalisation de traits de scie courts de 40 cm de long, 4 cm de profondeur et avec un espacement de 1,20 m au bord de chaque bande de béton. Ces amorces de fissuration doivent être réalisées dans les 24 heures suivant le coulage du béton. L'intention est de mieux contrôler le schéma de fissures du BAC. Entre-temps, les observations et les recherches ont montré qu'il s'agit d'une technique très efficace qui permet, en effet, d'éviter les fissures trop petites et trop grandes.

Les travaux sur l'E313 ont été menés avec succès, avec à nouveau d'excellents résultats en termes de rugosité, de planéité et de bruit de roulement. Jusqu'à 7 ans après la construction, aucune dégradation similaire à celles de la N49/E34 n'a été constatée. Les mesures prises semblent donc avoir fonctionné efficacement.



GEEL - KASTERLEE, N19g, 2013

La nouvelle route de raccordement entre Geel et Kasterlee faisait partie du projet PPP de la liaison Nord-Sud de la Campine. Ici aussi, la réduction du bruit du trafic était une exigence importante du projet. Cela a été réalisé en appliquant un BAC bicouche et/ou en installant des barrières antibruit dans les zones sensibles.



BRUGES - ZEEBRUGES, A11, 2014-2018

Pour améliorer l'accès au port de Zeebruges, l'A11 (E34) au sud de Westkapelle, a été reliée à la N31, au nord de Bruges, qui se raccorde ensuite à l'E40. De cette façon, le trafic portuaire lourd pourrait être dévié du trafic local et, en même temps, la sécurité du trafic pourrait être améliorée.

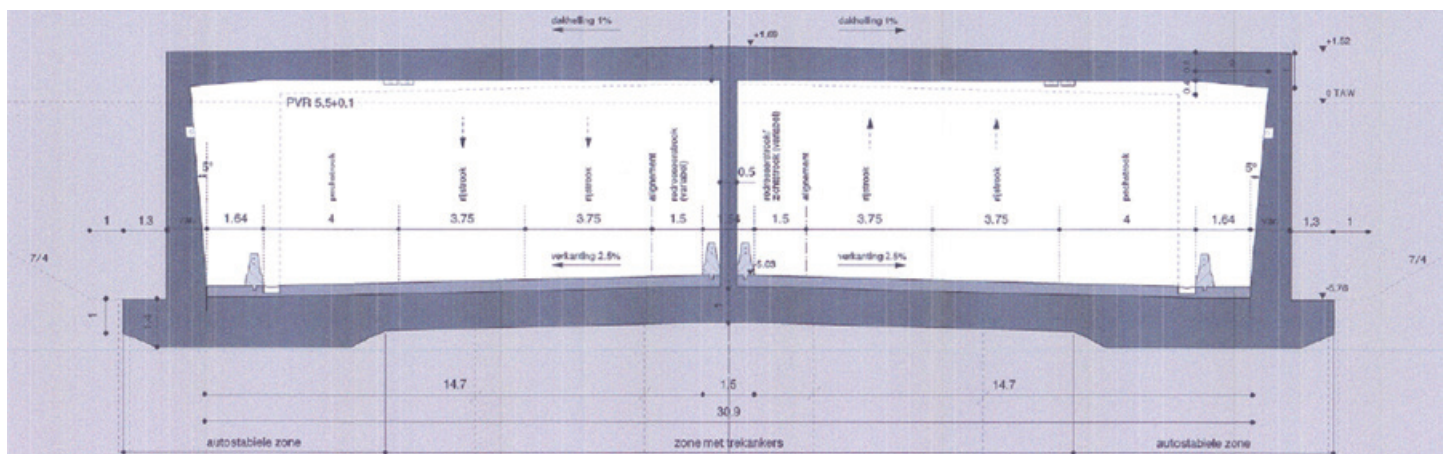
Pour la majeure partie des routes de ce projet PPP, l'asphalte a été choisi. Pour les différentes sections du tunnel, cependant, c'est un BAC bicouche qui a été choisi. Non seulement en raison de sa résistance au feu plus élevée, mais aussi pour sa durabilité, sa faible demande en entretien et sa réflexion de la lumière plus élevée.



Mise en œuvre dans une section du tunnel à ciel ouvert (© Willemen)

La coupe-type des tunnels est la suivante :

- Couche supérieure de 50 cm en béton lavé 0/6,3 mm ;
- Couche inférieure de 170 mm ; position de l'armature longitudinale à environ 50 mm sous la surface de la couche inférieure ;
- Couche sandwich de 50 mm en l'asphalte ;
- Couche de drainage en asphalte ouvert de 50 mm ;
- Tablier du tunnel d'épaisseur 1000 mm en béton ;
- 100 mm de béton maigre
- Piles de fondation.



(© Willemen)

COUVIN, N5/E320, 2018-2019

Le désengorgement de la commune de Couvin, au sud de la province de Namur, est devenu réalité par la construction d'une nouvelle route de 14 km de long. Ce périphérique fait partie de l'E320 et relie la N5 à Frasnes-les-Couvin à la frontière française à Brûly-Gué-d'Hossus (A304). La première phase de 5,1 km a constitué le désenclavement effectif du centre de Couvin et a été mise en service en octobre 2017. La deuxième phase, longue de 8,7 km, forme la connexion avec la frontière française et a été inaugurée en 2019. Le revêtement est un BAC bicouche constitué d'une couche inférieure de 170 mm (o/32) et d'une couche supérieure de 60 mm (o/6,3). Dans la première phase, les deux voies et la bande d'arrêt d'urgence ont été bétonnées en deux largeurs ; pour la deuxième phase, le revêtement a été coulé en une seule largeur de 10 m.



Construction de la 2ème phase du contournement à Couvin - bétonnage sur toute la largeur avec deux machines à coffrage glissant (photos chantier @ Cimbéton)



Vue de l'autoroute E420 terminée

6. ASPECTS PARTICULIERS DANS LA CONCEPTION ET LA COMPOSITION DE BÉTON DES REVÊTEMENTS BICOUCHE

Épaisseur et $D_{\max}$ du revêtement

En principe, l'épaisseur de la couche supérieure d'un revêtement en béton bicouche est réduite au minimum afin de diminuer la consommation de matières premières coûteuses et/ou de haute qualité. On obtient ainsi un avantage économique ou écologique maximal. L'épaisseur minimale doit tenir compte de la dimension maximale des gros granulats dans le mélange de béton. Les spécifications des cahiers des charges type belges prévoient ce qui suit :

- SB250 : une épaisseur standard de 50 mm pour une $D_{\max}$ standard de 6,3 mm ;
- CCT Qualiroutes : une épaisseur minimale de
 - 80 mm dans le cas de $14 \text{ mm} < D_{\max} \leq 20 \text{ mm}$
 - 70 mm dans le cas de $10 \text{ mm} < D_{\max} \leq 14 \text{ mm}$
 - 60 mm dans le cas de $6,3 \text{ mm} < D_{\max} \leq 10 \text{ mm}$
 - 50 mm dans le cas de $D_{\max} \leq 6,3 \text{ mm}$.

Granulats fins (sable)

Pour le sable, aucune exigence distincte ou spécifique entre les couches supérieure et inférieure n'est autorisée, à l'exception d'une disposition de la version 4.1 du SB250 : pour la couche inférieure d'un revêtement bicouche, il n'y a pas d'exigence concernant le coefficient de polissage accéléré de la roche mère pour le sable résultant du concassage et du tamisage des roches (pour les couches supérieures et la version à une couche, $PSV \geq 50$).

Dans tous les pays européens, le sable naturel (de rivière ou marin) est généralement utilisé pour le béton riche de la couche inférieure et de la couche supérieure. L'utilisation de sables recyclés (sable de concassage et de criblage) est risquée en termes d'ouvrabilité du mélange et de durabilité du béton durci.

Gros granulats (pierre concassée, gravier)

Bien entendu, des différences sont autorisées pour les granulats de la couche supérieure et ceux de la couche inférieure. Après tout, c'est généralement la raison pour laquelle un revêtement en béton bicouche est choisi.

Voici un tableau récapitulatif des différentes exigences suivant les cahiers des charges type belges :

	SB 250 Edition 4.1 (Flandres)	CCT Qualiroutes Edition 01/01/2020 (Wallonie)	CCT 2015 (Bruxelles)
Coefficient Los Angeles (LA) NBN EN 12620	LA ₂₅ ⁽¹⁾ LA ₂₀ (B1-B5) ⁽²⁾	LA ₃₀ ⁽¹⁾ LA ₂₅ (réseau I & II) ⁽²⁾	LA ₃₀ ⁽¹⁾ LA ₂₅ ⁽²⁾
Coefficient Micro-Deval (MDE) NBN EN 12620	MDE ₂₀ ⁽¹⁾ MDE ₁₅ (B1-B5) ⁽²⁾	MDE ₂₅ ⁽¹⁾ MDE ₂₀ (réseau I & II) ⁽²⁾	MDE ₂₅ ⁽¹⁾ MDE ₂₀ ⁽²⁾
Coefficient Polissage Accéléré (PSV) NBN EN 12620	PSV _{NR} ⁽¹⁾ PSV ₅₀ (B1-B5) ⁽²⁾	PSV _{NR} ⁽¹⁾ PSV ₅₀ (réseau I & II) ⁽²⁾	PSV _{NR} ⁽¹⁾ PSV ₅₀ ⁽²⁾
MDE + LA	—	≤ 45 ⁽¹⁾ ≤ 30 (réseau I & II) ⁽²⁾	≤ 45 ⁽¹⁾ ≤ 30 ⁽²⁾

(1) Couche inférieure d'un revêtement en béton bicouche

(2) Revêtement en béton monocouche ou couche supérieure d'un revêtement en béton bicouche

En Flandres, l'utilisation de granulats de béton recyclé de haute qualité est autorisée, mais limitée à 20 % (en volume) des gros granulats de la couche inférieure du revêtement bicouche.

Ciment

- Dosage

La quantité de ciment est adaptée à la teneur en mortier du mélange de béton. La quantité de mortier et donc la quantité de ciment augmente lorsque la $D_{\max}$ est plus faible, ce qui est généralement le cas pour la couche supérieure. A l'inverse, des granulats plus grands sont généralement utilisés dans la couche inférieure et la quantité de ciment peut donc diminuer. La teneur en ciment est en outre déterminée par la charge de trafic prévue (classe de construction en Flandre et à Bruxelles, type de réseau en Wallonie). Dans le SB250, version 4.1, chapitre 14, les quantités minimales de ciment suivantes sont indiquées (les valeurs concernant les couches inférieure et supérieure sont encadrées). Les mêmes valeurs s'appliquent dans le CCT Qualiroutes.

Application	Dimension maximale du granulat			
	31,5 mm	20 mm	14 mm	6,3 mm
Classe de construction B1-B5	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$	$\geq 425 \text{ kg/m}^3$
Sous-couche classe de construction B1-B5	$\geq 375 \text{ kg/m}^3$	-	-	-
Classe de construction B6-B10, BF	$\geq 350 \text{ kg/m}^3$	$\geq 375 \text{ kg/m}^3$	$\geq 375 \text{ kg/m}^3$	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$
Sous-couche classe de construction B6-B10, BF	$\geq 350 \text{ kg/m}^3$	-	-	-
Béton à prise rapide	-	$\geq 425 \text{ kg/m}^3$	-	-

- Type de ciment

Les cahiers des charges type belges exigent le même type de ciment (même type et classe de résistance, toujours avec une teneur en alcali limitée certifiée ou « LA ») pour la couche supérieure et la couche inférieure. L'objectif est d'assurer approximativement un comportement identique des deux couches en termes de temps de durcissement et de retrait. Il est évident que ce comportement ne sera jamais tout à fait le même en raison des différents types de granulats et du dosage en ciment différent utilisés pour les deux mélanges. Au niveau international, des revêtements bicouches ont déjà été posés avec différents types de ciment dans les couches supérieures et inférieures.

Facteur eau/ciment (E/C)

Comme mentionné ci-dessus, une teneur en ciment plus élevée est appliquée dans la couche supérieure en raison du $D_{\max}$ réduit des granulats. Tout en maintenant à l'identique le rapport E/C, cela entraînerait une teneur en eau plus élevée à doser et, par conséquent, une durabilité potentiellement réduite du béton (en raison de la perte de l'eau de gâchage du béton jeune et de la formation de micropores). Il est donc conseillé de réduire le rapport E/C afin de maintenir à l'identique la quantité d'eau du mélange.

Dans le SB250, version 4.1, chapitre 14, les rapports E/C maximums suivants sont d'application (les cas de la couche supérieure sont encadrés). Les mêmes valeurs s'appliquent dans le CCT Qualiroutes.

Classe de construction	Dimension maximale du granulat			
	31,5 mm	20 mm	14 mm	6,3 mm
Classe de construction B1-B5	$\leq 0,45$	$\leq 0,45$	$\leq 0,45$	$\leq 0,42$
Classe de construction B6-B10, BF	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Béton à prise rapide	-	$\leq 0,40$	-	-

De ce tableau et de celui des quantités minimales de ciment, il ressort en effet que la teneur en eau est maintenue pratiquement constante ; par exemple, pour la classe B1-B5 pour une version monocouche avec $D_{\max} = 20$ mm, la teneur en eau est $E = C \times E/C = 400 \times 0,45 = 180$ litres par m^3 , alors que pour la couche supérieure : $E = 425 \times 0,42 = 178,5$ litres par m^3 .

Utilisation d'un entraineur d'air

En principe, la teneur en air est adaptée à la fraction de mortier dans le mélange de béton: pour un $D_{\max}$ plus petit, il y a plus de mortier. Sachant que le mortier est plus sensible que les granulats à l'écaillage dû aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déglacage, une teneur en air plus élevée est alors nécessaire pour assurer la durabilité du revêtement. Ce principe est appliqué pour la couche supérieure des revêtements en béton bicouche.

Dans le SB250, version 4.1, cependant, aucune teneur en air n'est imposée. L'utilisation d'un entraineur d'air est facultative, mais la résistance aux sels de déverglaçage doit être démontrée via l'étude préliminaire effectuée dans le cadre du processus de certification du béton routier en question, ainsi que pendant la production. La nécessité d'un entraineur d'air dans la couche supérieure sera alors démontrée par les performances à atteindre.

Dans le CCT Qualiroutes, version 2020, le critère de teneur en air qui s'applique à un revêtement de $D_{\max} \leq 6,3$ mm est de $5 \leq v \leq 8$ avec v = teneur en air en % en volume du béton frais. À titre de comparaison : dans le cas d'une version monocouche avec $6,3 \text{ mm} < D_{\max} \leq 20$ mm, la teneur en air exigée est de $3 \leq v \leq 6$. Aucune exigence de teneur en air n'est obligatoire pour la couche inférieure.

Dans le CCT 2015, les mêmes exigences s'appliquent à la couche supérieure de la même manière que dans les CCT Qualiroutes, mais avec une teneur en air de $3 \leq v \leq 6$ également requise pour la couche inférieure.

Dans les pays étrangers, on utilise généralement un entraineur d'air dans la sous-couche et la couche supérieure, avec également une teneur en air adaptée en fonction du $D_{\max}$. En Belgique, on s'en écarte depuis plusieurs années pour les raisons suivantes :

- Le risque de dommages dus au gel dégel et au contact avec des sels de déglacage est moindre dans la couche inférieure que dans la couche supérieure;
- Sur la base des exigences relatives à la composition ($D_{\max}$, $C_{\min}$, $E/C_{\max}$) on peut supposer que le béton de la sous-couche est déjà suffisamment durable sans ajout d'air du fait qu'il y ait moins de mortier en raison d'un $D_{\max}$ plus élevé ;
- L'adhérence béton/acier est potentiellement améliorée dans le cas d'un béton armé continu avec un béton sans entraineur d'air.

7. POINTS D'ATTENTION LORS DE LA POSE DE CHAUSSÉES EN BÉTON BICOUCHE

Production du béton

Le béton bicouche requiert deux compositions de béton pouvant provenir de deux centrales à béton différentes. Comme alternative, une seule centrale mobile peut être montée sur chantier. Elle produit alors les deux compositions. Cela signifie que, dans tous les cas, ce type de mise en œuvre nécessite un déploiement logistique et opérationnel adaptés au niveau de la ou des centrales. En effet, il est impératif d'assurer que les matières premières ainsi que les dosages adéquats se trouvent dans la composition de béton appropriée, sans contamination de l'une avec l'autre.

Fourniture du béton

La sous-couche est normalement alimentée par des camions benne capables de transporter de grandes quantités de béton. L'approvisionnement en béton de la couche supérieure peut également se faire par camion benne, mais il est aussi possible d'utiliser des camions-mixers. La coordination, avec précision, de la fourniture des deux compositions de béton est bien entendu cruciale. En raison des épaisseurs spécifiques aux deux couches, il faut environ compter 4 charges de béton de la sous-couche pour une charge de béton de la couche supérieure, pour une épaisseur de revêtement de 25 cm. Ainsi, la signalétique sur les camions et sur chantier doit être optimale de manière à facilement identifier la couche concernée de manière claire pour les personnes sur chantier. Par exemple, un système de drapeaux de couleur ou un marquage sur le pare-brise du camion peuvent être utilisés à cet effet. Typiquement, chacune des compositions peut être reconnue à sa consistance : la composition pour la sous-couche a un aspect plutôt terre humide et à structure grossière, alors que celle de la couche supérieure est plus fluide et à structure fine. Même si une centrale mobile est utilisée pour la fabrication du béton, une fois le béton déversé pour être posé, aucune erreur ne peut être commise.



La désignation « SUP » fait référence à un béton destiné à la couche supérieure (couche SUPérieure).



Allemagne, Würzburg, A7 : le béton de la couche supérieure est transporté sur un tapis roulant au-dessus de la première machine à coffrage glissant jusqu'à la couche inférieure (© Klaus Felsch, Heidelberg Cement)

Gestion de l'espace et du temps sur chantier

Toute personne qui veut travailler a besoin d'espace. Sur le territoire belge, l'espace disponible à côté des routes est généralement limité, surtout lors de la refaçon de routes existantes. Or, l'espace est un facteur important pour coordonner l'approvisionnement des différents types de béton.

La couche supérieure doit être appliquée sur la sous-couche dans les 30 minutes (méthode « frais sur frais »). Pour la construction de routes à haut gabarit, il est donc conseillé d'utiliser deux machines à coffrage glissant. La vitesse moyenne de progression est d'environ 1 mètre par minute et il y a donc une distance maximale de 30 mètres entre les machines. Cela dit, il existe aussi une alternative : en Autriche et en Allemagne, les entrepreneurs routiers utilisent une version intégrée des deux machines, de sorte que les deux opérations se suivent automatiquement.

Compactage et finition des couches

Le béton de la sous-couche est compacté à l'aide d'aiguilles vibrantes, soit par des machines, soit par des coffrages glissants à commande manuelle. Aucune finition de surface ni protection contre la dessiccation n'est nécessaire pour la sous-couche. La lisseuse ou « *supersmoother* » n'est pas non plus autorisée pour la sous-couche.

Dans le cas d'un béton goudonné, les goudons sont enfoncés par vibration dans la sous-couche. Parfois, ils sont également placés manuellement dans des fentes préformées.

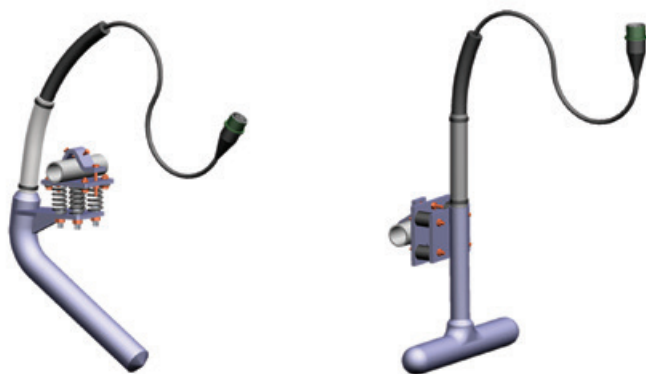


Allemagne, Trèves : goudons enfoncés par vibration dans la sous-couche



Lommel, Kristalpark : pose des goudons dans les fentes réalisées dans la couche inférieure

La couche supérieure doit également être bien compactée, mais il faut absolument éviter que les granulats de la couche inférieure ne pénètrent à travers la couche supérieure jusqu'à la surface. Un léger mélange entre les deux couches est autorisé voire recommandé, car cela assure le caractère monolithique à la structure. A cet effet, certaines machines à coffrage glissant sont équipées de vibreurs plats en forme de T.



Comparaison entre une aiguille vibrante classique et une aiguille vibrante en forme de T pour la couche supérieure (photos ©Wirtgen)

Dans la version manuelle, le compactage est effectué avec une poutre vibrante légère où la couche supérieure est simplement nivelée avec une poutre ou une règle. Une fine couche supérieure est plus facile à étaler et à aplatir qu'une couche de béton épaisse. Cela profite à la planéité et donc au confort de roulement.

8. CONCLUSIONS

Les revêtements en béton bicouche sont de plus en plus utilisés en raison des avantages économiques et environnementaux qu'ils offrent. Le coût des matériaux coûteux de la couche supérieure est réduit, tandis que la couche inférieure a un caractère plus écologique grâce à l'utilisation de granulats recyclés et à une teneur réduite en ciment.

L'amélioration des caractéristiques de la surface est également un avantage important :

- rugosité grâce à l'utilisation de granulats de haute qualité ; planéité améliorée grâce à la couche supérieure plus fine ;
- réduction du bruit de roulement grâce à une texture béton lavé à la granulométrie optimale ;
- et, si souhaité, un aspect décoratif grâce à l'utilisation de mortier et/ou de granulats colorés en surface.

Dans la plupart des pays européens, le revêtement de dalles de béton goudonnées lavé bicouche est utilisé pour la construction d'autoroutes en béton. La Belgique, en revanche, dispose d'un grand savoir-faire dans le domaine du béton armé continu bicouche.

Dans le cadre de la politique européenne pour un environnement neutre sur le plan climatique d'ici 2050 et de la nécessité d'une économie circulaire, les revêtements en béton bicouche offrent de nombreuses possibilités pour l'avenir.



Mise en œuvre d'un revêtement bicouche à l'aide de deux machines à coffrage glissant intégrées (photo ©Wirtgen)

BIBLIOGRAPHIE

1. BEELDENS A., BOONEN E. , Centre de Recherche Routière. Fotokatalyse: de luchtzuiverende weg. (Photocatalyse : la route à propriété purifiante). Congrès Belge de la route, Liège, 2013
2. BEELDENS A., VYNCKIER B., LAMBERT G., BALFROID N. Two case studies of two lift CRCP on Belgian highways: the open tunnel on the E34 and the ring road of Couvin (E420). 13th International Symposium on Concrete Roads, Berlin, Germany, 2018
3. BERNACCHIO A., Wirtgen GmbH. Slipform paving – Two lift concrete pavement construction. First Concrete Roads Congress and Exhibition, Ankara, Turkey, 13-14 November 2019
4. GROUPEMENT PROFESSIONNEL DES FABRICANTS DE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL DE BELGIQUE. Béton de ciment portland artificiel. Allées de jardins. Chemins d'accès. Trottoirs. Bruxelles, 1930
5. CABLE J., Iowa State University. Reassessing two-lift paving. Tech transfer summary, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa, U.S., September 2004
6. CABLE J.K., FRENTRESS D.P. Two lift Portland cement concrete pavements to meet public needs. Technical Report, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Iowa, U.S., September 2004
7. CHAVET J.K., LEFEBVRE G., MANOUVRIER J., ROEGIES M. Traitement de surface des revêtements en béton de ciment. Dénudage par voie chimique. Article dans la revue La Technique Routière N°. 4/1982
8. DUTRON R., DESPA E. La route en béton en Belgique. 15 années d'expérience. Conclusions – Propositions. Bulletin technique N° 7. Premier Congrès national de la Route, Liège, 1930
9. HOOKER K.A. How about a (second) lift ? Article in Concrete Construction, www.concreteconstruction.net, March 2011
10. RENS L., VAN WIJNENDAELE I., Tweelaags DGB met hergebruik van betonpuin in de onderlaag: ervaringen op de E34 te Zwijsdrecht. (Le BAC bicouche avec réutilisation de débris de béton dans la couche inférieure: expériences de la E34 à Zwijsdrecht). Congrès Belge de la Route, Gent, 2009
11. RENS L., DE KOKER G., GROENEN N., COVEMAERKER F., SCHARLAEEKENS S. Comparison of two rehabilitation worksites of motorways: single versus double layered CRCP. 12th International Symposium on Concrete Roads, Prague, Czech Republic, 2014
12. RENS L. Voiries et revêtements extérieurs en dalles de béton. FEBELCEM, Bruxelles, 2015
13. SNELL L.M., SNELL B.G., Concrete Construction Resource Unit. Oldest concrete street in the United States. Article in Concrete International Magazine, March 2002
14. SOMMER H., Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. The Austrian experience with concrete pavements. Jornades sobre pavimentos de hormigon, Alicante, ES, 1999
15. VAN DE CRAEN H., Colas, VAN AUDENHOVE P. , OCCN-CRIC. Sierbetonverharding van het Sint-Jansplein te Antwerpen. (Revêtement en béton décoratif pour la place Sint-Jan à Anvers). Congrès belge de la Route, Genval, 2001
16. VERHOEVEN K. Le comportement du béton armé continu. CRIC, Bruxelles, 1992

Avec nos remerciements à Nathalie Balfroid (CEMCO Consult)



I-12

Ce bulletin est publié par :

FEBELCEM

Fédération de l'Industrie Cimentière Belge

Bld du Souverain 68 bte 11 - 1170 Bruxelles

tel. 02 645 52 11

www.febelcem.be

info@febelcem.be

Auteur: ir. L. Rens (FEBELCEM)

Photos : FEBELCEM (sauf mention contraire)

Dépôt légal :

D/2020 /0280/06

Éd. resp. :

H. Camerlynck

infobeton.be

