

VOIES DE TRAM EN BÉTON

INFRASTRUCTURE | AVRIL 2017

111	(94)	f2	(E2)
-----	------	----	------

BB/SfB

- CONCEPT DE « SLAB TRACK » OU VOIE SUR DALLE
- DALLES DE BÉTON
- BÉTON ARMÉ CONTINU
- SOLUTIONS STANDARD ET ÉTUDES DE CAS





Anvers, De Leien – Voie combinée tram-bus

Nombreuses sont les grandes villes en Europe qui mènent une politique de (re)valorisation des transports en commun. Cette approche positive entend encourager davantage de conducteurs de voiture à se tourner vers les transports en commun, dans une perspective d'amélioration de la qualité de vie dans les villes. À cet égard, des projets d'infrastructure de pré-métro et de tram occupent une place importante. Ainsi, en 2012, les travaux d'aménagement ou d'extension de lignes de pré-métro et de tram en Europe en phase de réalisation représentaient un total de 488 km de voies, tandis que 1086 km supplémentaires se trouvaient en phase de planification.

La Belgique compte un nombre relativement élevé de lignes de tram par habitant (30,2 km/million d'habitants), concentrées dans les grandes villes : Bruxelles, Anvers, Gand et Charleroi, sans oublier le tram de la Côte. Tous ces lieux ont fait l'objet de travaux divers au cours des 15 dernières années, qu'il s'agisse de rénovations ou d'aménagement de nouvelles liaisons, et ce développement se poursuit. D'autres systèmes de trams tout à fait novateurs sont également prévus, comme à Liège.

Les transports en commun urbains associent généralement trams et bus. Dès lors, ces réseaux sont souvent aménagés sur des voies combinées trams-bus, accessibles ou non au trafic ordinaire. Dans ces cas de figure, les fortes sollicitations dues à la circulation des bus et aux vibrations causées par les trams ont souvent motivé le choix du béton comme matériau de revêtement. Cette tendance s'observe également dans plusieurs pays européens : des réalisations de voies de tram-bus en béton existent notamment en Belgique, en France, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni, ...

La présente publication dresse le tableau des expériences dans le domaine des voies de tram-bus en béton à l'appui de quelques brèves études de cas. Nous reviendrons ensuite plus en détail sur les aspects techniques en jeu lors des phases de conception et d'exécution. Enfin, nous présenterons des solutions standards en dalles de béton et en béton armé continu, sur base d'exemples de réalisations.



Au cours des dernières décennies, la France a particulièrement joué un rôle de précurseur dans l'aménagement de lignes de tram dans des dizaines de villes et d'agglomérations (Photos : CIMbéton).

CONCEPT DE « SLAB TRACK », OU VOIES SUR DALLE

Dès les années 1990, des projets d'aménagement de voies de tram étaient en cours dans plusieurs villes européennes (aux Pays-Bas à La Haye et Rotterdam, au Royaume-Uni à Sheffield, en Allemagne à Munich, en France à Nantes, Montpellier, Grenoble, ...).

Nombre de ces réalisations ont été mises en œuvre sur le principe des voies sur dalle : un concept de voies ferrées dans lesquelles le ballast en empierrement est remplacé par une fondation en béton. Cette forme de voies sans ballast a été conçue principalement pour les lignes à grande vitesse (trafic ferroviaire) afin d'en réduire l'entretien, de les rendre plus disponibles et de leur conférer une plus longue durée de vie. Une manière également d'éviter la projection de ballast à grande vitesse. Malgré un coût d'investissement initial plus élevé, ce concept permet bien de réduire les coûts sur la durée de vie des voies. Cependant, l'application de voies sur dalle s'est manifestée encore plus clairement dans les systèmes de transport urbains, à savoir le tram et le métro.

Trois systèmes de conception de voies sans ballast sont décrits ci-dessous.

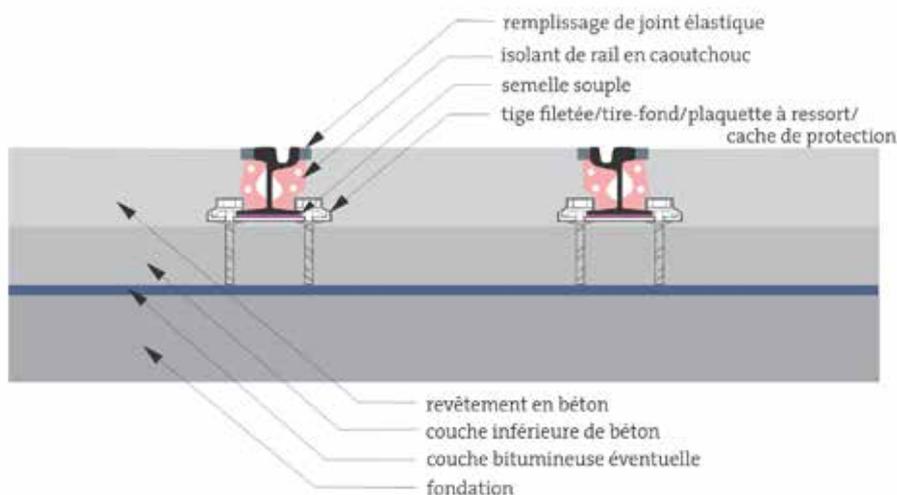
SYSTÈME 1 :

Un premier système concerne une fondation en béton sur laquelle les rails sont fixés, de manière ponctuelle, de manière continue ou de manière hybride. À l'instar des voiries en béton, la dalle de béton est réalisée de préférence à l'aide d'une machine à coffrages glissants, mais elle peut également être coulée sous les rails une fois posés. Cette fondation en béton peut être conçue sous forme de dalles de béton ou d'une dalle de béton armé continu sans joints.

La fixation ponctuelle des rails est généralement assurée au moyen de tire-fonds et de plaquettes à ressort. Pour le montage initial, il existe différents systèmes de réglage et d'ajustement en hauteur.



Rails montés sur une fondation au moyen de tiges filetées et de vis de réglage. La couche inférieure de béton sera coulée après la pose des rails (Photo De Lijn)



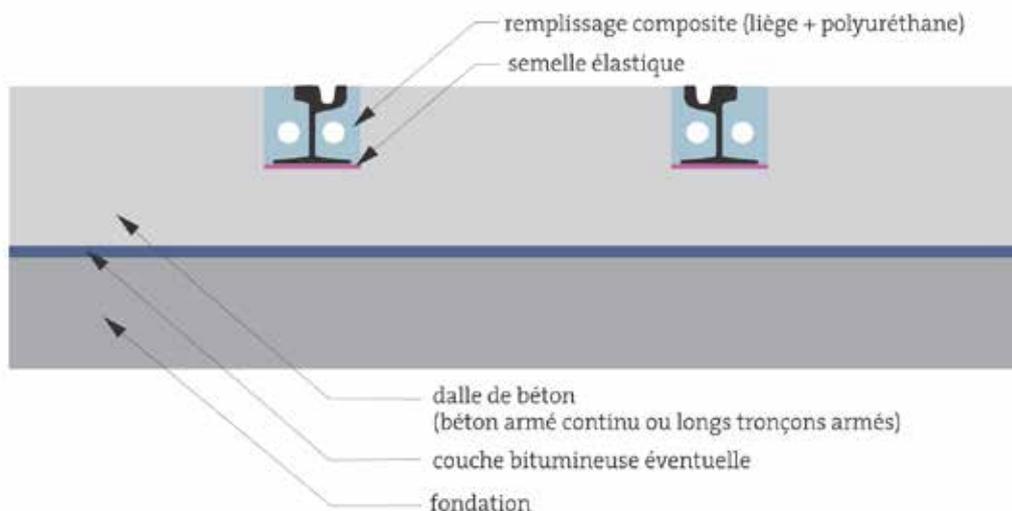
Système 1 avec fixation des rails de manière ponctuelle

Le support continu est obtenu en scellant le rail dans une gorge pratiquée dans le béton à l'aide d'un matériau composite élastique (liège + polyuréthane).

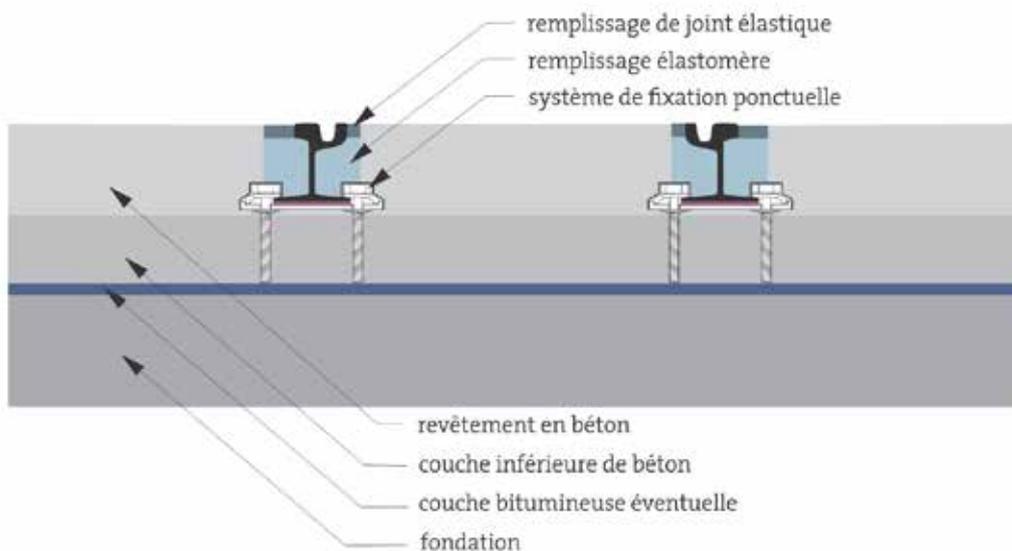
Suivant le système de fixation, qualifié de « système hybride », les rails sont fixés dans une gorge par des supports de fixation ponctuels. Cette gorge est ensuite remplie en deux couches au moyen de deux matériaux différents. Ceux-ci doivent permettre d'amortir les bruits et les vibrations, éviter l'introduction de corps étrangers et assurer la sécurité des cyclistes et des piétons et enfin de conserver une élasticité au dispositif. Ce système de scellement doit permettre le remplacement éventuel des rails. Le terme « hybride » provient du principe de fixation et du remplacement possible.

En cas de fixation des rails dans des gorges, l'épaisseur des dalles est généralement de 40 cm, voire plus. Dès lors, la structure fait directement office de revêtement de chaussée. Dans ce cas, on applique généralement du béton armé continu avec un pourcentage d'armature longitudinale élevé (jusqu'à env. 1 % de la section de béton). Une autre possibilité consiste à aménager la structure des voies de tram en longs tronçons pouvant atteindre 30 à 40 m de longueur. Des joints transversaux de construction et de dilatation sont alors prévus entre les dalles. S'agissant par ailleurs de prévenir les fissures, les dalles sont armées selon un pourcentage d'armature correspondant à celui d'un béton armé continu. Un point important concerne le goujonnage des joints transversaux entre les longs tronçons successifs pour assurer le transfert de charges voulu. Une opération assurément nécessaire lorsqu'un tapis antivibratoire sous-jacent est prévu, qui accroît le risque de mouvement vertical au droit du joint.

Système 1 avec fixation continue des rails



Système 1 avec fixation des rails dans une gorge par des supports ponctuels

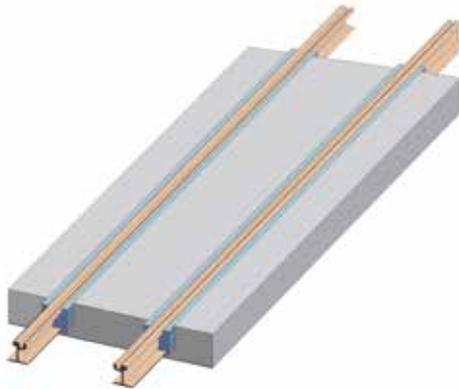


SYSTÈME 2 :

Un deuxième système est constitué de dalles préfabriquées. Ici, la fixation des rails peut être assurée de manière ponctuelle ou continue. Les dalles préfabriquées peuvent être déjà totalement parachevées, revêtement compris, ou faire l'objet d'un parachevement ultérieur sous la forme d'une couche supérieure en béton. Les rails dépassent des deux côtés des éléments préfabriqués. Après la pose des rails, ces derniers émergeant de la dalle sont soudés les uns aux autres, puis la brèche de clavage est scellée au moyen de béton coulé en place ou à l'aide d'une petite dalle préfabriquée.



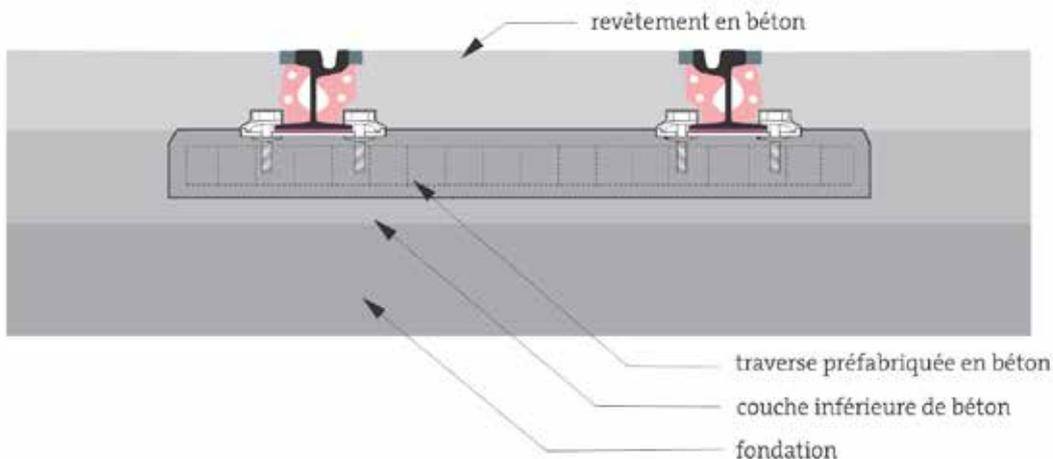
Dalle préfabriquée à rails intégrés
(Photo : www.socea.be)



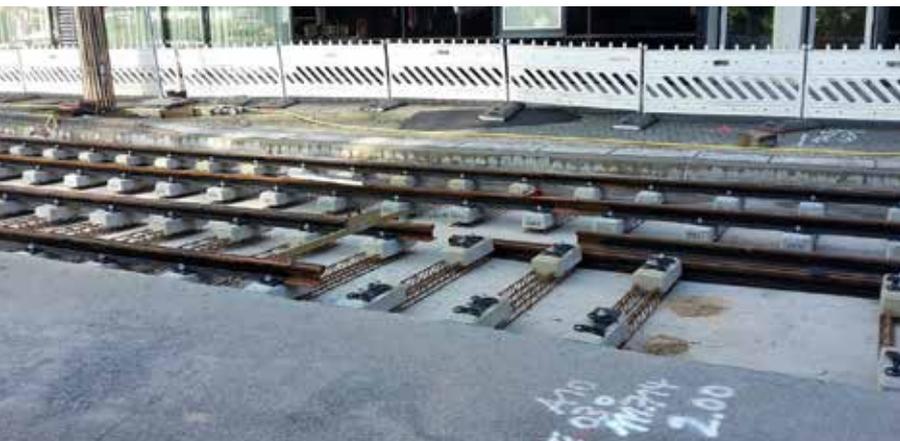
Système 2 avec fixation continue des rails

SYSTÈME 3 :

Le troisième mode d'exécution consiste à fixer dans le béton des traverses préfabriquées en béton, sur lesquelles les rails sont fixés. Les traverses sont placées sur une fondation, puis scellées dans une couche inférieure de béton. Cette couche inférieure de béton (traditionnellement dans un béton de classe de résistance C30/37) est coulée autour des traverses, prenant la forme d'une surface plane affleurant la face supérieure des traverses sur lesquelles le revêtement routier est posé.



Système 3 avec
fixation des rails de
manière ponctuelle



*Les traverses « bi-bloc », constituées de deux blochets en béton, reliés par une entretoise métallique, sont une alternative aux traverses classiques en béton.
(Photo : AB-Roads)*

Bien entendu, toutes les structures décrites ci-avant doivent être soutenues par une fondation adaptée, généralement constituée de matériaux liés au ciment (béton sec compacté, béton maigre ou un empierrement traité au ciment).

Dans certains cas, un empierrement non lié (de porphyre 0/20 mm ou 0/32 mm) à granulométrie continue peut être posé. Dans ce cas, les traverses sont placées sur l'empierrement, ce qui permet d'ouvrir assez rapidement les voies à la circulation des trams. À cet égard, il est important de veiller à ce que l'empierrement soit confiné latéralement, en particulier aux carrefours ou aux points de traversée, où aucune bordure longitudinale n'est prévue pour assurer le contrebutage. Cette solution s'est toutefois avérée moins durable que les variantes composées d'une fondation à base de liants hydrauliques.



*Blankenberge - Aménagement d'une fondation en béton sec compacté
(Photo : Tractebel)*



*Bruxelles – exemple de fondation en empierrement non lié et, par-dessus, les traverses en béton, scellées ensuite par coulage intermédiaire de béton
(Photo : AB-Roads)*

DE LA « VOIE SUR DALLE » À LA VOIE DE TRAM-BUS

L'extension de la voie de tram classique à une voie de tram-bus en milieu intra-urbain a nécessité l'intégration du concept de revêtement routier dans la conception de la voie de tram. Au fil des années, divers systèmes ont été utilisés pour ces voies de tram-bus, certains se soldant par l'apparition relativement rapide de phénomènes de dégradation.

La structure très hétérogène, la faible largeur entre les rails intégrés séparément et l'intégration des aiguillages et autres accessoires nécessaires sur les voies nécessitent une analyse spécifique détaillée pour assurer une bonne solidarisation entre les voies et le revêtement.

En quête d'une solution optimale, une approche systémique a été utilisée. Chaque objet (système de voie - structure de la chaussée - mesures antivibratoires), au lieu d'être considéré de manière isolée, est mis au point comme un élément du système, la compatibilité des différents éléments de ce système étant par ailleurs vérifiée et optimisée.

Une solution réussie doit prendre en compte l'exécution phasée en milieu urbain, l'enjeu n'étant pas uniquement d'assurer une interruption limitée du trafic des trams, mais également de parvenir à un résultat hautement qualitatif sur le plan de l'aménagement spatial et du résultat visuel et architectural. À cet égard, les applications en béton lavé coloré ou en béton imprimé permettent de respecter les exigences esthétiques et architecturales tout en assurant une bonne intégration de la voie de tram-bus dans son milieu (voir les exemples repris à la page ...).

D'autres exigences sont de nature plus technique, comme la possibilité de remplacer les rails, l'intégration des aiguillages, la maîtrise des vibrations et, bien entendu, les exigences posées au revêtement classique de la voirie. Celui-ci doit résister à la charge de trafic tout au long de sa durée de vie sans présenter de dégâts majeurs ni nécessiter d'interventions structurelles importantes, tout en admettant l'entretien qui s'impose.

La combinaison du trafic des trams et des bus sur une même bande de circulation renforce également les exigences en termes de revêtement. Outre la charge du tram transmise par le biais des voies à la structure sous-jacente, il convient également de reprendre la charge résultant du trafic routier sur le revêtement. Les bus circulant en site propre suivent souvent les mêmes trajectoires et, de surcroît, leurs roues longent souvent les voies de tram, ce qui accroît les contraintes de traction près des bords du revêtement.

La pratique a clairement démontré que les revêtements monolithiques en béton, bien conçus et bien réalisés, présentent le taux de réussite le plus élevé. Des éléments de revêtements modulaires (pavés de béton, pavés en pierre naturelle) peuvent éventuellement être intégrés dans des éléments préfabriqués en béton, de sorte qu'ils se comportent comme une structure monolithique.

La zone jouxtant les voies est la plus critique car l'infiltration d'eau y est difficilement évitable et le trafic y génère des tensions supplémentaires compte tenu des sollicitations en bord de dalle.



Gand, Korte Meer et Mortsel, Liersesteenweg – l'aiguillage intégré, le système de drainage de voie et d'autres accessoires nécessitent un détail spécifique de conception et d'exécution. Au droit des aiguillages, l'adjonction d'une plaque métallique rapportée de forme triangulaire permet d'éviter la présence d'éléments aigus en béton



Dalle préfabriquée en béton à pavés en pierre naturelle intégrés

FINITIONS DE SURFACE D'UNE VOIE DE TRAM-BUS



Anvers, De Leien – Finition de la surface par brossage transversal



Mortsel, Liersesteenweg – Béton lavé à base de porphyre



Blankenberge – Béton lavé à base de gravier de mer et de colorant brun ocre



Gand, Rozemarijnbrug – Béton lavé à base de quartz blanc



Gand, Korenmarkt – Béton lavé à base de quartz blanc et de grès, en harmonie avec les pavés contigus en pierre naturelle



Bruxelles, Avenue Fonsny - Béton imprimé

EXPÉRIENCES EN BELGIQUE - EXEMPLES

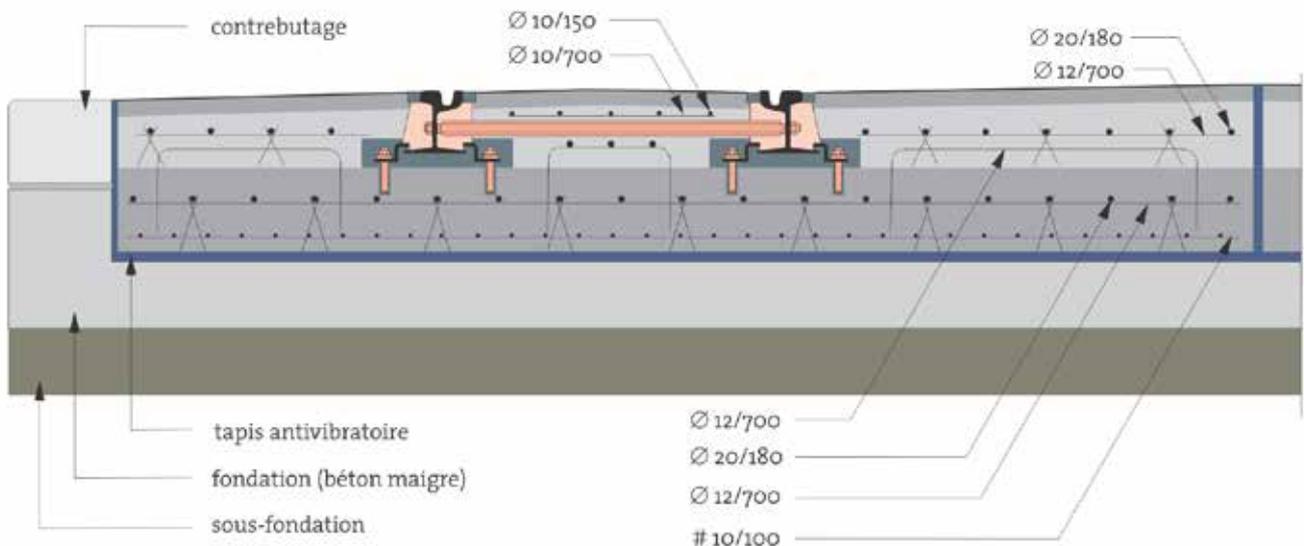
GAND - VOSKENS LAAN - SYSTÈME 1 À FIXATION PONCTUELLE

L'année 2002 a marqué le début de la première phase de réalisation à Gand d'une ligne de tram sur la Voskenslaan reliant la Gare de Gand Saint-Pierre et le Flanders Expo. Ce fut l'une des premières réalisations belges d'une voie de tram-bus en béton accordant également une place centrale à un aménagement optimal de l'espace public. Parmi les autres exigences du projet figuraient également la réduction des niveaux sonore et vibratoire. Le choix s'est porté sur une structure multicouche en béton armé continu comportant un tapis antivibratoire entre la dalle de circulation des trams et la fondation en béton maigre.



Gand, Voskenslaan
(Photo : M. Diependaele)

Gand, Voskenslaan:
schéma d'armature et
structure de la voie de
tram en béton armé
continu



La couche inférieure de béton, d'une épaisseur de 25 cm, comporte un double treillis d'armature. Elle présente sur sa partie supérieure des étriers en saillie assurant la liaison avec la couche de béton suivante. Les rails ont été positionnés correctement sur cette couche de finition lisse au moyen de vis de réglage. La deuxième couche de béton, d'une épaisseur comprise entre 15 et 19 cm, a été réalisée en béton armé continu. Enfin, la troisième couche de béton, de 5 cm d'épaisseur, en béton décoratif coloré de haute qualité (Dmax 8 mm, granulats blancs et noirs), a été appliquée sur la deuxième couche frais sur frais. Les différentes couches ont été réalisées par bandes au moyen d'une machine à coffrages glissants.



*Gand, Voskenslaan -
Exécution : réalisation
de la couche inférieure
en béton à la machine à
coffrages glissants - vue
de la couche inférieure
et des étriers intégrés,
assurant la liaison
entre les couches -
réalisation de la couche
supérieure à la machine
à coffrages glissants -
Dépavage de la couche
supérieure décorative
(Photos : M. Diependaele)*



*Surface en béton
désactivé*

HOBOKEN - SINT-BERNARDESESTEENWEG - SYSTÈME 1 À FIXATION HYBRIDE

En 2003-2004, une voie de tram en site propre a été aménagée dans le tronçon central de la Sint-Bernardsesteenweg à Hoboken. Cette voie a été conçue sur la base d'un concept de voirie classique en béton armé continu posée sur une couche intermédiaire en asphalte, reposant elle-même sur une fondation en béton maigre. À la différence du chantier de la Voskenslaan, les rails ont été positionnés dans ce cas sur la couche intermédiaire en asphalte, du béton étant coulé par ailleurs entre coffrages fixes. Ici aussi, la voie de tram en béton proprement dite est constituée de deux couches : une couche inférieure en béton classique C30/37 et une couche supérieure en béton routier à surface lavée, présentant toutes deux une épaisseur de 20 cm. Dans ce cas, la couche inférieure de béton n'a pas dû être aplanie. En dehors de l'armature, des étriers en saillie ont aussi été noyés immédiatement dans le béton afin de solidariser les couches.

Hoboken, Sint-Bernardsesteenweg, de gauche à droite : rails, posés sur la couche intermédiaire d'asphalte - vue de l'armature - compactage de la couche inférieure de béton



*Hoboken, Sint-Bernardsesteenweg
(Photo : Socea)*



ANVERS - DE LEIEN - SYSTÈME 1 À FIXATION HYBRIDE

Lors du réaménagement des « Leien » à Anvers, le concept de longues dalles armées (env. 40 m), séparées par des joints de dilatation a été mis en oeuvre. Les dalles de 40 cm d'épaisseur reposent sur une couche intermédiaire d'asphalte et sur des fondations en empierrement stabilisé au ciment.

*Anvers, De Leien
- vue de la voie de tram-bus
- détails du joint de dilatation entre les longues dalles armées*



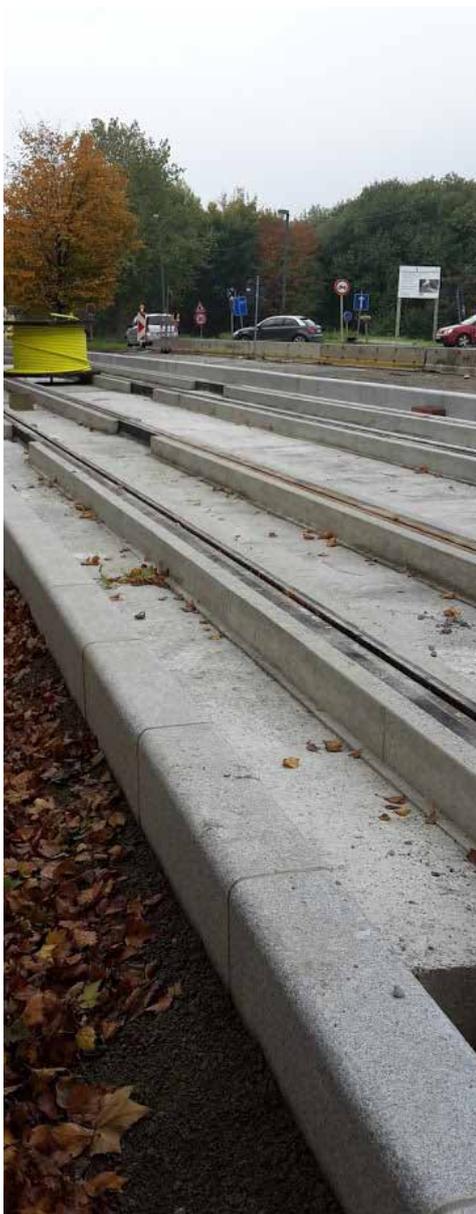
BRUXELLES - DIVERS ENDROITS - SYSTÈME 2

Des éléments de voie préfabriqués ont été utilisés en divers endroits à Bruxelles, qu'il s'agisse de poutres longitudinales ou de dalles préfabriquées à rails intégrés.



Bruxelles – application d'éléments de voie préfabriqués : poutres longitudinales à Laeken et dalles de voie préfabriquées à Anderlecht

L'aménagement de la nouvelle ligne de tram 9, reliant Simonis au plateau du Heysel (réalisation 2016-2018) recourt à des éléments de voie préfabriqués à rails intégrés, contre lesquels le béton est ensuite coulé. Ces longrines ou « poutres-rail » préfabriquées sont placées sur des poutres transversales qui sont alors scellées dans le béton de remplissage. L'avantage de ce système tient à la possibilité de remplacement ultérieur des rails et au coulage du revêtement contre une surface plane.



*Bruxelles : système à poutres-rails, reposant sur des poutres transversales
(Photos : AB-Roads)*

ASPECTS TECHNIQUES

GÉNÉRALITÉS

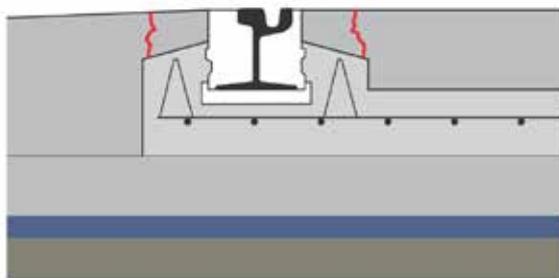
En termes de conception d'une voie tram-bus, la structure qui supporte le tram, appelée « système slab track » ou voie sur dalle, se distingue de la structure qui reprend les contraintes liées au trafic, le « revêtement routier ». Le principe général d'une voie tram-bus en béton, est le suivant :

- La fondation sert de support au système de voies. Il s'agit d'une fondation routière classique destinée à un trafic lourd (empierrement lié au ciment, béton maigre ou béton sec compacté), comportant une éventuelle couche intermédiaire en asphalte de 50 mm. Cette couche d'asphalte assure l'adhérence entre la structure supérieure en béton et la fondation sous-jacente liée hydrauliquement, elle présente une surface de travail plane destinée à permettre la suite de la réalisation.
- Les rails sont placés sur la fondation soit par l'intermédiaire d'un système de pose ou de traverses, soit intégrés dans des gorges prévues à cet effet, dans des dalles préfabriquées ou dans des longrines, ou « poutres-rail ».
- La couche inférieure de béton est posée environ jusqu'au niveau inférieur des rails. Il convient de veiller à ce que l'épaisseur de la couche supérieure, à poser ensuite par-dessus, soit la plus constante possible et suffisamment épaisse.
- Vient enfin la réalisation du revêtement en dalles de béton ou en béton armé continu. Ce revêtement est solidarisé ou non à la couche inférieure de béton. Il comportera toujours une armature de retrait dans sa partie supérieure et éventuellement une armature structurale dans sa partie inférieure. Cette dernière armature est recommandée en l'absence d'adhérence ou de liaison entre les deux couches. L'application de dalles non armées est fortement déconseillée, compte tenu de la forme très variable des dalles (rapport longueur/largeur élevé) et de l'épaisseur souvent limitée. La présence d'accessoires de voie dans le béton peut également entraîner une préfissuration dans toutes les directions. La finition de surface peut consister en un broissage, en un dénudage chimique ou en l'application d'une empreinte dans le béton frais.

ÉPAISSEUR DU REVÊTEMENT

Pour obtenir un revêtement durable en béton, il est nécessaire de lui assurer une épaisseur constante sur toute la largeur, et certainement en l'absence d'adhérence ou de liaison avec la couche inférieure de béton. La présence d'épaisseurs réduites, par exemple au droit des traverses, générera des tensions supplémentaires et augmentera, par conséquent, le risque de fissuration.

Section de béton trop mince présentant un risque de fissuration



ADHÉRENCE OU LIAISON AVEC LA COUCHE INFÉRIEURE DE BÉTON

L'adhérence et/ou la liaison avec la couche inférieure de béton réduira fortement les tensions en traction sur la face inférieure du revêtement. D'autre part, le risque de remontée de fissures de la couche inférieure de béton vers le revêtement, est un peu plus élevé. La pratique démontre que la pose d'une armature de retrait dans le revêtement permet de limiter le risque de remontée de fissures.



Les étriers soutenant l'armature longitudinale servent également à solidariser les couches inférieure et supérieure de béton (Photo : De Lijn)

Si on décide d'appliquer les deux couches sans adhérence, par exemple en prévoyant une couche intermédiaire en géotextile non tissé ou en géo-composite, il n'y a pas de risque de propagation des fissures de la couche inférieure vers la couche supérieure. Toutefois, les contraintes liées au trafic et aux variations thermiques risquent d'être trop élevées dans la dalle de béton supérieure, pouvant provoquer l'apparition de fissures. Ces contraintes sont plus élevées qu'en situation de trafic classique, en effet une grande partie des véhicules roule sur le bord du revêtement. Dans ce cas, il est toujours recommandé de prévoir une double armature dans le revêtement.

Il est déconseillé d'appliquer un film plastique visant à empêcher l'adhérence. En effet, un tel dispositif forme une surface de glissement ayant pour effet de permettre aux premiers joints pratiqués dans la dalle de béton de s'ouvrir trop largement.

Ces dernières années, le système bicouche (sans adhérence, avec insertion d'une membrane intermédiaire et application d'une double armature dans la couche de revêtement) a été fréquemment utilisé en Flandre. Le système présente l'avantage supplémentaire de permettre, au besoin, le remplacement aisé du revêtement de chaussée en béton (par bande) sans que l'on doive toucher à la structure sous-jacente, ce qui n'est pas ou moins le cas des systèmes présentant une adhérence entre les couches de béton.



Ici, les couches de béton inférieure et supérieure sont isolées par un géotextile. Dans ce cas, la dalle supérieure est doublement armée. (Photo : AB-Roads)

VIBRATIONS - PLACEMENT D'UN ISOLANT

Le trafic routier, et plus encore la circulation des trams, génèrent des vibrations dans la structure. Diverses solutions existent pour en réduire au maximum l'impact pour les riverains.

Une première solution consiste à envelopper localement les voies de tram proprement dites. Les rails sont alors placés dans une enveloppe élastique. Cette solution offre non seulement l'avantage d'amortir les vibrations le plus rapidement possible, mais aussi de permettre le coulage du béton contre les faces verticales, lui assurant dès lors partout une épaisseur et une largeur identique. Autre avantage : ce système permet de faciliter le renouvellement des voies si nécessaire. Le matériau isolant est alors remplacé en même temps que les voies.



Rails enveloppés dans un matériau antivibratoire

Une deuxième solution consiste à réaliser l'ensemble de la structure dans un système flottant. À cet égard, il s'agit d'envelopper la structure d'une couche antivibratoire. Celle-ci doit être placée tant en dessous de la structure que sur les faces latérales, afin d'atténuer les vibrations et d'empêcher que celles-ci ne se propagent vers le sous-sol et les éléments adjacents. La couche verticale latérale doit être appliquée sur toute la hauteur afin de prévenir des ponts de béton et des risques d'épaufrures des bords du béton.

Il convient également de remarquer que le placement d'une couche antivibratoire sous-jacente peut poser des problèmes de durabilité mécanique. En effet, on a constaté que la couche pouvait former une surface de glissement, amplifiant le mouvement de la structure dans son ensemble. Ce phénomène peut accentuer l'ouverture des joints longitudinaux, surtout à l'intérieur d'un virage. D'autre part, la structure aura tendance à pousser vers l'extrados du virage, situation qui est susceptible d'endommager les constructions adjacentes.

Compte tenu de la présence de la couche antivibratoire, le battement vertical des dalles en béton sera également amplifié. Dans ce cas, il est recommandé de prévoir le goujonnage des dalles au niveau du projet. Aussi, dans la mesure du possible, un système antivibratoire localisé autour des rails sera privilégié.

Gand, Voskenslaan - Réalisation d'une couche inférieure en BAC sur un tapis antivibratoire (a donné lieu à des déplacements non souhaités de la structure, la préférence initiale d'un dispositif antivibratoire étant dès lors accordée à la réalisation d'une enveloppe isolante des rails) (Photo : Tractebel)



POSSIBILITÉ DE REMPLACEMENT DES VOIES DE TRAM

Les voies de tram sont sujettes à l'usure. En effet, les roues en acier du tram circulent directement sur les profilés en acier des rails ce qui, sur un tracé rectiligne, peut donner lieu à une usure de 20 mm sur 40 ans. Cela signifie que la durée de vie du rail correspond théoriquement à la durée de vie du revêtement. À certains endroits, comme dans les virages, on observe cependant une usure accrue ayant pour effet de ramener la durée de vie du rail à seulement 10-15 ans. Il en résulte que, sur la durée de vie du revêtement, le rail doit être remplacé une ou plusieurs fois dans les virages. Par conséquent, la pose des profilés doit être de nature à permettre leur remplacement sans que l'on doive démonter l'ensemble de la structure. L'utilisation de gorges permet ce remplacement et cette technique est à conseiller, a fortiori en cas de revêtement adhérent.

Dans le cas d'un revêtement non adhérent, on peut également opter pour la pose de rails sur des dispositifs de fixation, avec placement de profilés verticaux élastiques (sans gorge), le revêtement devant alors être partiellement éliminé pour le remplacement des voies. Les dispositifs de fixation servant à fixer le rail sur les traverses doivent toujours être protégés au moyen d'un cache de protection qui permettra le dévissage ultérieur.



Gand, Kouter : Gorge dans laquelle les rails sont fixés ponctuellement au moyen de boulons; le coffrage latéral est ensuite éventuellement ôté et l'espace entre les rails et le béton est rempli au moyen d'un élastomère (fixation « hybride », au moyen de boulons de serrage mais potentiellement remplaçable).

A gauche: Rails fixés dans la gorge avant le bétonnage -

Milieu: Rail dans la gorge après le bétonnage et avant l'élimination du coffrage -

A droite: Vue de la surface finie, rails intégrés (Photos : AB-Roads)



Cache de protection sur une vis, permettant le remplacement ultérieur des rails



Anvers, Nationalestraat – Géotextile entre les couches de béton inférieure et supérieure
(Photo : CRR)

SYSTÈME DE DRAINAGE INTERNE

L'infiltration d'eau dans la structure, à cause d'imperfections ou d'un défaut d'homogénéité, en présence de charges dynamiques, etc. ne peut jamais être exclue. L'eau piégée entre les différentes couches de béton pose un risque élevé de pompage ou de gonflement en cas de gel. Dès lors, lorsque les couches inférieure et supérieure de béton ne sont pas solidarisiées, par exemple au moyen d'étriers métalliques, il est recommandé de prévoir une couche intermédiaire multifonctionnelle.

Il peut s'agir d'un géo-composite d'environ 4 mm d'épaisseur, constitué de 2 couches de géotextile non-tissé enfermant un tissu synthétique tridimensionnel, pouvant combiner les fonctions suivantes :

- désolidarisation des couches de béton – évitant la remontée des fissures ;
- drainage horizontal interne de l'eau d'infiltration.

De petits conduits de drainage de 50 à 100 mm de diamètre sont également prévus pour assurer l'évacuation de l'eau drainée horizontalement à travers la couche de béton inférieure et la fondation liée au ciment. Ils sont par exemple réalisés tous les 10 mètres. En cas de fondation en empierrement non lié sous les traverses, il est également possible d'évacuer les faibles quantités d'eau par l'intermédiaire de cette couche de fondation. Enfin, on peut encore prévoir éventuellement un drain longitudinal pour assurer le drainage de cette couche de fondation.

Structure d'un
géo-composite



SOLUTION STANDARD EN DALLES DE BÉTON

Un revêtement en dalles de béton est constitué d'une succession de dalles, séparées par des joints transversaux, dans le respect de deux principes de conception à savoir un rapport longueur/épaisseur limité à environ 25 et un rapport longueur/largeur ne dépassant pas 1,5 à 1,75. Ces deux exigences concernent d'une part la flexion du revêtement, induite par les charges de trafic et, d'autre part, le phénomène de soulèvement des bords de dalles, appelé « curling » ou cintrage. Dans le cas de voies de tram, il est évident que la deuxième exigence est difficile à remplir, compte tenu de la largeur des bandes, limitée par la présence des voies. En armant suffisamment les dalles, on peut déroger à ces principes de conception et envisager un revêtement présentant des longueurs de dalle d'env. 2,5 m et des largeurs d'env. 0,80 m à 1 m.

L'ancrage du revêtement dans la couche inférieure de béton permet d'obtenir une structure monolithique offrant une bien meilleure résistance aux charges appliquées. Dans ce cas, la présence d'une armature supérieure dans la couche de revêtement est suffisante. Comme nous l'avons vu plus haut, cette configuration présente l'inconvénient que la couche supérieure ne peut pas être remplacée par bandes ou dans son intégralité. Si on opte pour un revêtement indépendant, posé sans adhérence ou liaison avec la couche inférieure, les contraintes de traction en dessous de cette couche seront plus élevées et il convient par conséquent de prévoir une double armature, en partie inférieure et supérieure.

L'armature peut être constituée de treillis d'armature classiques ou de cages d'armature réglables en largeur. Ces éléments peuvent être préfabriqués en longueurs élevées, permettant une pose simple, rapide et correcte à côté des rails et entre ceux-ci.

Les étriers présentent de préférence un diamètre de 8 mm et sont placés tous les 150 mm. Ils soutiennent l'armature

longitudinale. L'armature longitudinale proprement dite est constituée de barres de 8 ou 10 mm de diamètre, placées selon un entraxe de 15 mm. Elle est posée avec un enrobage minimal de béton de 50 mm, sur l'étrier. L'armature longitudinale supérieure est toujours sciée au droit du joint de retrait, afin de ne pas entraver le fonctionnement du joint. L'armature longitudinale inférieure présente un enrobage minimal de 40 mm.

Différents types de joints sont appliqués : le joint longitudinal qui, dans le cas de voies de tram-bus, consiste généralement en un joint de construction situé juste à côté des voies ou le long du bord latéral du revêtement ; le joint de retrait transversal, réalisé traditionnellement au moyen d'un trait de scie sur $\frac{1}{3}$ de l'épaisseur ; le joint de construction transversal et le joint de dilatation, ces deux derniers ne formant souvent qu'un seul joint.

La distance entre les joints de retrait transversaux est généralement comprise entre 1,5 m et 3 m. Au droit des joints transversaux, il convient de contrôler la nécessité de prévoir un transfert de charges supplémentaire au moyen de goujons. Les goujons sont des barres lisses, traitées contre la corrosion et posées dans les joints transversaux. Ils permettent un déplacement horizontal longitudinal des dalles les unes par rapport aux autres, rendant dès lors possible le fonctionnement du joint, mais empêchent un déplacement vertical relatif et assurent dès lors un bon transfert de charges entre les deux dalles. Souvent, il n'est pas prévu de goujons dans les joints de retrait. Le transfert de charges intervient alors soit par l'armature inférieure, dans le cas de dalles non adhérentes, soit au travers de la structure sous-jacente et par interaction dans le joint en cas de dalles adhérentes. L'application de goujons dans les joints de dilatation et dans les joints de construction transversaux sont, elles, bien prévues.



Coupe transversale d'une voie de tram en dalles de béton à traverses intégrées. Le revêtement de chaussée est constitué de dalles courtes avec double armature.



(Photo : André Nullens)

Afin de reprendre les mouvements thermiques longitudinaux, des joints de dilatation peuvent être réalisés tous les 30 à 40 m. Ces joints sont réalisés sur toute l'épaisseur du revêtement en béton, ils sont remplis d'un matériau compressible et sont toujours goujonnés. L'armature inférieure est donc interrompue à cet endroit. Les joints de dilatation sont réalisés, dans le cas de voiries classiques, à des endroits spécifiques : aux raccords avec d'autres revêtements en asphalte ou revêtements modulaires, au droit d'ouvrages d'art rigides ou dans des virages à faible rayon de courbure, où le béton risque d'être poussé vers l'extérieur. Lors de la mise en œuvre, il est très important qu'aucun pont de béton n'apparaisse dans la partie inférieure ou supérieure du joint car ces ponts de béton pourraient faire éclater des morceaux de béton à côté du joint. Il est préférable d'éviter les joints de dilatation au droit de carrefours ou au droit de traversées.

SOLUTION STANDARD EN BÉTON ARMÉ CONTINU

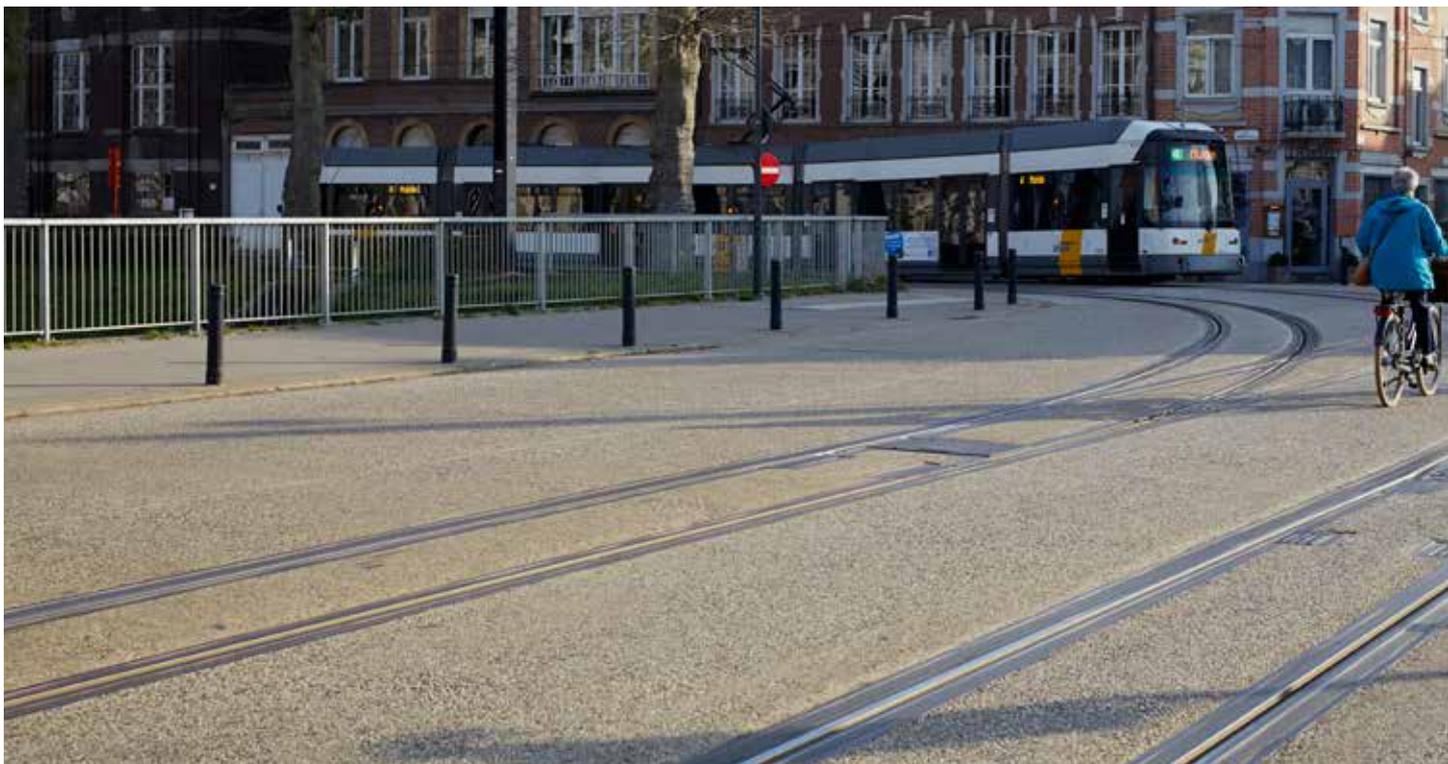
Une autre option de revêtement consiste à utiliser du béton armé continu (BAC). Dans ce cas, on ne réalise pas de joints de retrait transversaux. Ceux-ci sont remplacés par une série de fines fissures, réparties à intervalles réguliers dans le sens transversal. Ces fissures apparaissent sous l'effet des contraintes dues au retrait et à la circulation, ainsi que des contraintes thermiques.

Elles restent fermées par l'armature longitudinale continue posée dans la partie supérieure du revêtement. Compte tenu des dimensions non conformes (largeur limitée) du revêtement en béton dans le cas de voies de tram-bus, le pourcentage d'armature longitudinale classique de 0,75 % de la section du béton est souvent porté à 1 %.

En plus de l'armature longitudinale classique dans la partie supérieure (barres de 20 mm de diamètre, disposées tous les 140 à 150 mm), un treillis d'armature est placé dans la partie inférieure de béton (diamètre : 12 mm ; maillage : 150 mm). Les étriers assurant la liaison entre les couches inférieure et supérieure de béton, présentent un diamètre de 12 mm et un entraxe de 400 mm. L'utilisation de BAC assure un confort de circulation élevé, limite fortement l'entretien et garantit une longue durée de vie. Dans le cas du béton armé continu, de fines fissures sont toutefois visibles dès le départ. Elles donnent lieu quelquefois à des remarques des passants sur le plan esthétique. La présence de ces fissures est toutefois inhérente au BAC et ne met pas en péril la durabilité du béton.

L'armature du BAC est placée sur toute la longueur et ne peut pas être interrompue. Aux extrémités, le mouvement du revêtement est bloqué par une culée d'ancrage comportant 3 à 6 voiles, intégrés dans le sol à une profondeur totale (revêtement + voile) d'environ 1,1 mètre. Au droit des virages serrés ou de constructions fixes, il convient d'appliquer un ancrage pour prévenir le glissement du revêtement.

Le béton armé continu est utilisé à des endroits où un trafic particulièrement lourd est à prévoir. S'il offre une durabilité élevée, il présente cependant l'inconvénient de son prix initial plus élevé et de la nécessité de réaliser des culées, ce qui n'est pas toujours simple en milieu urbain. Pendant l'aménagement de la voirie, le chantier doit pouvoir être maintenu libre de toute circulation et de tout passage des trams et un phasage des travaux par section n'est pas indiqué.



(Photo : André Nullens)

ÉTUDES DE CAS

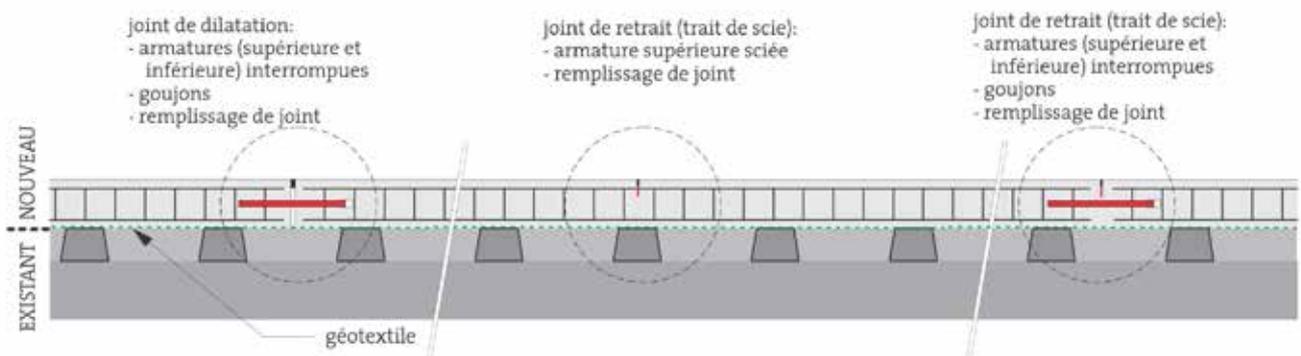
SOLUTION STANDARD EN DALLES DE BÉTON : NATIONALESTRAAT À ANVERS

La voie de tram-bus dans la Nationalestraat constitue un cas particulier de conception et d'exécution de revêtement en béton, celle-ci ayant été aménagée sur un soubassement existant. Dans un premier temps, la Nationalestraat avait été pavée. Cependant, le revêtement s'est très vite dégradé. En effet, la rangée de pavés jouxtant les voies s'est détachée, ces pavés ayant été placés contre le système d'isolation aux vibrations des voies. Or, il s'agit précisément de la zone qui est soumise aux plus fortes contraintes des roues de bus. La pose des pavés dans un lit de mortier n'a pas pu prévenir l'apparition de fissures dans les joints et a entraîné la dégradation de la cohésion structurale du revêtement de pavés.

*Affaissements des pavés
en pierre naturelle le
long des rails et au droit
du joint de dilatation
(Photo : OCW)*



Dès lors, il a été décidé de réaménager la Nationalestraat et d'y appliquer un revêtement en béton. Le choix s'est porté sur des dalles de béton armé, non liées à la couche sous-jacente et dont la longueur maximale était de 2,5 m. Les dalles sont armées d'un double treillis d'armature. Le treillis supérieur est sectionné au droit du joint de retrait, le treillis inférieur se poursuivant sur une longueur de 15 m. À cette entre-distance, on prévoit en alternance un joint de retrait avec goujons ou un joint de dilatation avec goujons.



Anvers, Nationalestraat : structure du revêtement en béton avec 3 types de joints

La chaussée a été démontée jusqu'à la couche de béton sous-jacente. Cette manière de procéder a permis de dégager les boulons assemblant les voies aux traverses, coulées dans la couche sous-jacente. Les boulons ont été protégés, avant la pose du béton routier, au moyen d'un cache en plastique. Avant la pose du revêtement en béton, la couche de béton existante a été aplanie le mieux possible et un système de drainage vers les fondations sous-jacentes a été prévu par carottage à distance régulière à travers la couche sous-jacente et ensuite par remplissage de gravier. Le drainage de la partie supérieure est assuré par une bande de drainage dans le sens longitudinal, qui recouvre le carottage pratiqué.

L'armature est composée d'étriers et d'une armature longitudinale qui a permis de travailler en largeur variable. Au droit des aiguillages, une armature en fibres de verre a été utilisée afin d'éviter les interférences avec les signaux de commande.

Le béton est coulé sur une épaisseur minimale de 20 cm. La surface est lavée. Les matériaux utilisés (porphyre, quartz blanc et basalte noir) présentent un diamètre maximal de 20 mm. Résultat : une surface de béton élégante et durable, conforme aux exigences esthétiques pour cette importante artère de la mode à Anvers.



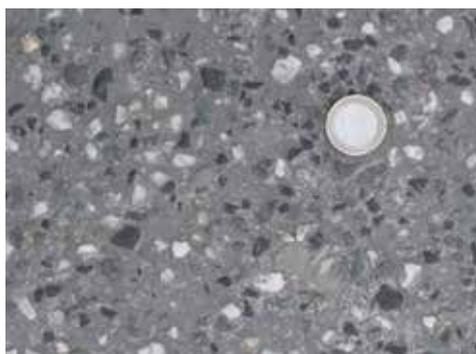
Vue de l'armature longitudinale et des étriers transversaux de la couche supérieure de béton (Photo : OCW)



Zone comportant une armature en fibres de verre afin de prévenir les interférences avec les signaux de commande (Photo : CRR)



Joint transversal de dilatation goujonné (Photo : OCW)



Vue détaillée de la surface lavée à base de porphyre, de basalte noir et de quartz blanc

L'aménagement de ce revêtement ne fut pas évident : il s'agissait de garantir à tout moment l'accessibilité des magasins. De plus, la largeur de la voirie ne permettait pas d'acheminer le béton à l'aide de camions benne ou de camions-mixers. Par conséquent, le choix s'est porté sur un système de pompage du béton depuis les rues latérales.

L'intégration des couvercles de chambres de visite, des chambres de visite proprement dites et des avaloirs a fait l'objet d'une attention particulière. À chaque fois, il a été décidé de prévoir des armatures de renfort autour des points singuliers.



Sciage des joints longitudinaux (Photo : CRR)



Acheminement du béton par pompage (Photo : CRR)



Armatures de renfort autour d'une chambre de visite



*Application d'un retardateur de prise sur la surface
(Photo : CRR)*



*Réalisation de la couche supérieure de béton à la
poutre vibrante (Photo : CRR)*

SOLUTION STANDARD EN BÉTON ARMÉ CONTINU : PAPEGAAISTRAAT ET ROZEMARIJNBRUG À GAND

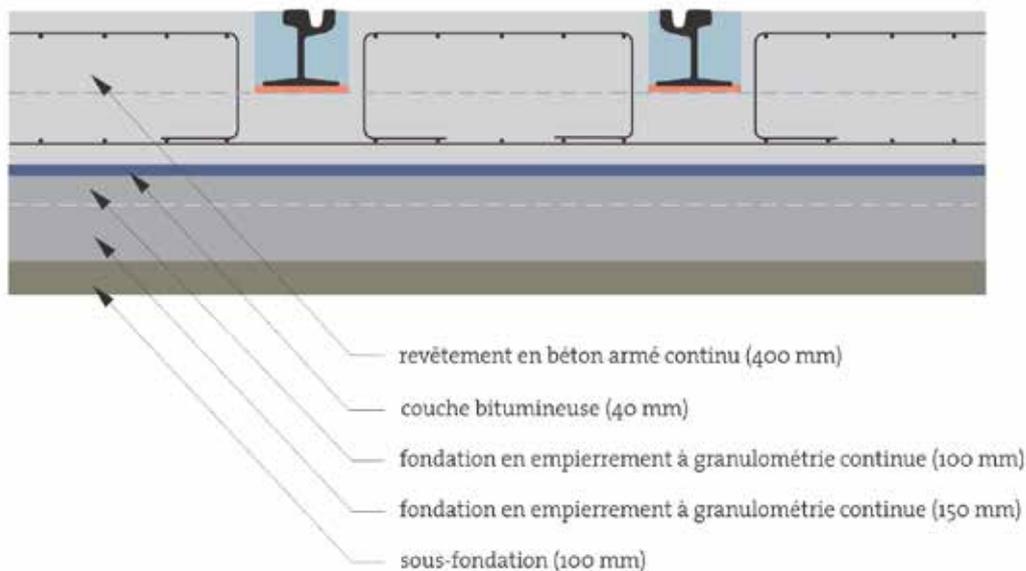
À Gand, le choix du revêtement pour l'aménagement du tram de la Papegaaistraat et du Rozemarijnbrug s'est porté sur le béton armé continu. Le défi majeur du béton armé continu en milieu urbain concerne d'une part la réalisation des culées d'ancrage et, d'autre part, la mise en œuvre du béton sur un espace limité.

La pose des culées d'ancrage a été effectuée au niveau des passages vers des revêtements existants et juste avant un virage serré. Trois culées d'ancrage ont été placées à chaque fois.

Sur le plan de la composition, la solution appliquée a été la suivante (matériaux conformes au Cahier des charges type 250 pour la construction routière de la Région flamande) :

- Revêtement en BAC, posé en 2 couches, épaisseur totale : 400 mm ;
- Couche intermédiaire en asphalte, épaisseur : 40 mm ;
- Empierrement stabilisé de type IA, épaisseur : 250 mm, appliqué en 2 couches ;
- Sous-fondation de type I, sable, épaisseur : 100 mm.

Gent, Papegaaistraat – Rozemarijnbrug : structure de la voie de tram et du revêtement





Vue d'ensemble de l'armature des couches inférieure et supérieure de béton (Photo De Lijn)



Bétonnage de la couche supérieure conformément au schéma de joints longitudinaux et vue de la réalisation (Photos : De Lijn et AB-Roads)

*Vue des détails d'armature au droit des aiguillages
(Photo : De Lijn)*





(Photos 3ème et 4ème de couverture : André Nullens)



I 10

Le présent bulletin est une publication de :
FEBELCEM
Fédération de l'Industrie cimentière belge
Boulevard du Souverain, 68 - 1170 Bruxelles
Tél. : 02 645 52 11 - Fax : 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

Auteurs :

Dr Ir A. Beeldens, AB-ROADS

Ir L. Rens, FEBELCEM

Avec la collaboration de

l'lr Filip Flement, DE LIJN

et de l'Ing. Wim De Smet, DE LIJN

Photos :

FEBELCEM sauf mention contraire

Dépôt légal :

D/2017/0280/06

Éd. resp. : A. Jasienski

infobeton.be

BIBLIOGRAPHIE

1. DIEPENDAELE M., Technum; Technum ; RENS L., FEBELCEM. Een trillingsvrije trambusbaan in doorgaand gewapend beton met gekleurde deklaag. Bijdrage voor het 20^e Belgisch Wegencongres te Brussel, 28-30 september 2005 (Voie de tram-bus sans vibration en béton armé continu à couche de revêtement colorée. Contribution au 20^e Congrès belge de la route à Bruxelles, 28-30 septembre 2005)
2. ERRAC (The European Rail Research Advisory Council); UITPC. Metro, light rail and tram systems in Europe, October 2012
3. FLEMENT F., BLOMME K., De Lijn; RENS L., FEBELCEM; BEELDENS A., BRRC. Towards a standardized design structure for concrete tramways in Flanders. Paper at the 12th International Symposium on Concrete Roads, Prague, 23-26 September 2014
4. RENS L., FEBELCEM. Slab-track toepassingen in trambaanconstructies: principes en buitenlandse verwezenlijkingen. Proceedings van KVIV studiedag "Gemengde spoorbaanconstructies voor tram en bus", Antwerpen, 16 oktober 2002 (Applications de slab tracks dans des constructions de voies de tram : principes et réalisations étrangères. Comptes rendus de la journée d'étude du KVIV « Constructions de voies ferrées mixtes pour les trams et les bus », Anvers, 16 octobre 2002)