

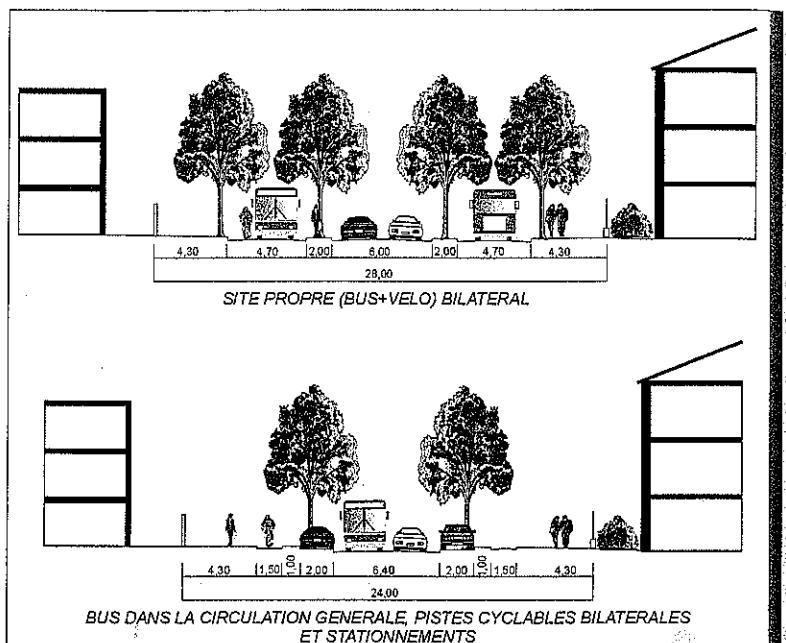
Les chaussées à structure et à surface partagées décrites antérieurement [1] sont, parmi d'autres, des éléments de réponse à cette nouvelle logique de mixité entre les différents acteurs et utilisateurs de la voirie, et plus particulièrement en ce qui concerne leurs modes de déplacement. La recherche d'un nouvel équilibre entre la circulation automobile individuelle et les modes collectifs est de règle dans bon nombre d'agglomérations. Les plans de déplacements urbains (PDU), et leur déclinaison concrète sur le terrain en contrat de pôle souvent multimodal et en charte d'aménagement d'axe, fournissent des opportunités de redéfinition de l'occupation de l'espace public en surface. De la sorte, il est souvent mis en exergue des aires pour tout ou partie dévolues aux transports collectifs de surface. Les figures 1 et 2 illustrent de telles recompositions de l'espace avec l'insertion de lignes de tramway ou de voies de bus en sites propre ou banalisé. De manière générale, on cherche à mettre en adéquation les espaces fonction « déplacement » et l'ergonomie des voiries afin d'identifier les dysfonctionnements et l'ambiance des rues et avenues, et de les corriger s'il y a lieu.

Le retour d'expériences opéré cette dernière décennie sur le comportement de ces nouveaux espaces affectés aux transports collectifs de surface a montré que leur conception, leur réalisation et leur maintenance sont plus délicates qu'il n'y paraît de prime abord, car il faut réunir simultanément un très haut niveau

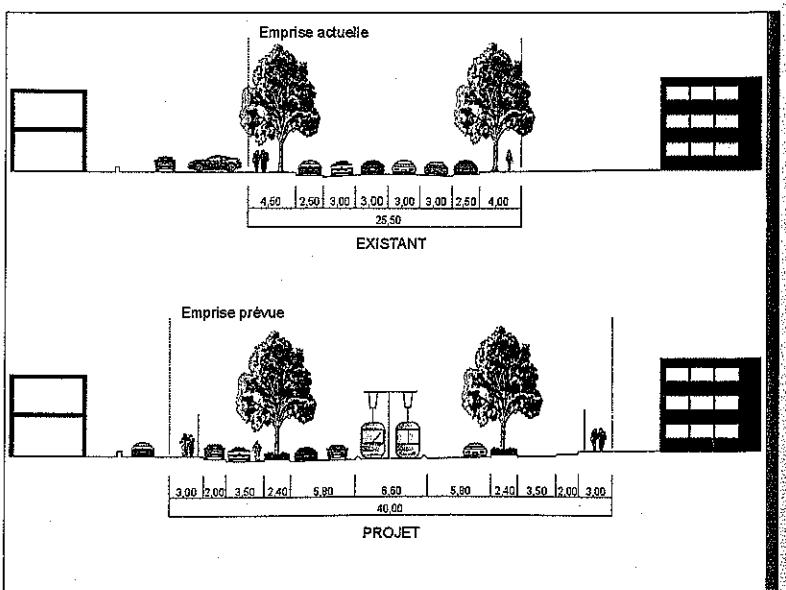
Nouveaux besoins, nouvelles perspectives Le cas du matériau béton

Autrefois identifiée comme lieu de rencontre entre ses différents usagers, la voirie urbaine est aujourd'hui avant tout un lieu de partage entre les fonctions de plus en plus diversifiées que doivent assurer les espaces publics, avec en filigrane un suivi constant de recherche d'urbanité.

2417



▲ Figure 1
Projet d'aménagement de voirie urbaine dans une emprise disponible de 28 m
▲ Urban roadway improvement project in an available right of way of 28 m



▲ Figure 2
Projet de réhabilitation de route nationale en entrée d'agglomération

esthétique immédiate et sur le long terme, empruntée à la fois de la créativité des concepteurs et d'une sobriété qui s'accorde mieux du temps ;

intégration au site bâti et ses influences liées à l'activité riveraine / harmonie des surfaces et volumes ;

la lisibilité et la perception des espaces par tous les citadins, cohérence avec un parti global d'aménagement pour la ville, le quartier ou la ligne de transport en commun ;

la durabilité des matériaux au travers des structures et des revêtements mais aussi des différents systèmes d'assemblage : joints, profilés, attaches, synergies soumises ensemble aux sollicitations mécaniques peuvent être sévères et agressives ;

les conditions d'exécution en espace finé, encombré par des réseaux d'appareillages, à multiples phasages et liaisons lors de la mise en œuvre ;

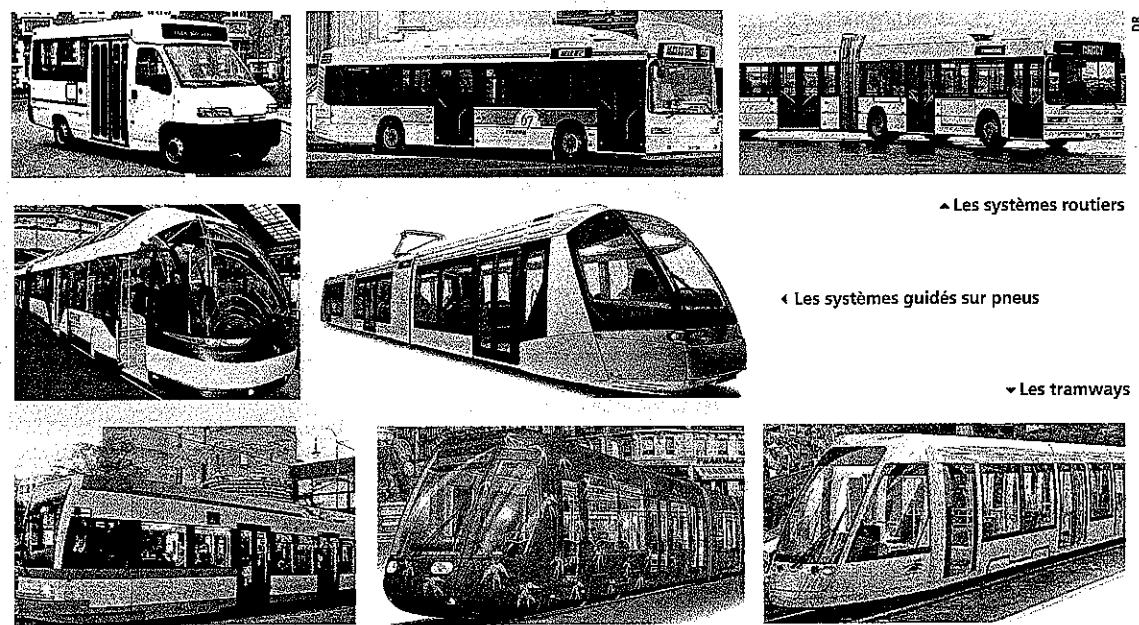
la réduction des nuisances en termes d'exploitation, de bruit, de vibration compris d'isolation électrique, pour maîtriser des phénomènes comme les courants vagabonds ;

la faisabilité de maintenance et de réparation dans des périodes très restreintes, souvent de nuit et suivant des cycles qui doivent prendre en compte les sujétions d'exploitation de l'infrastructure dans son ensemble (tache, meulage et rechargement des rails, par exemple).

À cette complexité qui appelle nécessairement à une vision systémique que normative pour chacun des constituants des projets, essayons de faire ressortir un certain nombre d'aspects qui peuvent valablement être traités avec la technique des bétons armés pétroblématiques, dès lors que les règles essentielles de conception d'exécution de cette technique sont respectées.

Les différents systèmes de transport collectif sur surface

Recensement des systèmes de transport collectif de surface [2] identifie au sein des matériaux roulant communément la voirie des villes, trois familles



▲ Les systèmes routiers

◀ Les systèmes guidés sur pneus

▼ Les tramways

▲ Figure 3
Les trois familles de systèmes de transport collectif sur la voirie urbaine - Exemples de matériels opérationnels ou prototypes

▲ Three families of public transport systems on the urban roadway – Examples of operational or prototype systems

- > les systèmes routiers (bus, trolleybus, autocar),
- > les systèmes guidés sur pneus (tramway sur pneus),
- > les tramways (sur rails).

Examinons quelques spécificités propres à chaque famille et présentons quelques réalisations en béton seul ou associé à d'autres matériaux.

Les systèmes routiers (bus, trolleybus, etc.)

Les systèmes routiers sont constitués de véhicules dont les plus lourds pèsent 19 t PTC avec deux essieux (essieu maximum 11 t) ou 32 t sur trois essieux pour les bus articulés.

En termes de dimensionnement standard, ces véhicules peuvent être assimilés à des poids lourds ordinaires que les méthodes de dimensionnement savent cumuler en nombre et agressivité, de manière à identifier les contraintes admissibles en fatigue pour les matériaux de corps de chaussées et déterminer ainsi le dimensionnement de la structure pour une plate-forme de portance spécifiée.

La figure 4 présente des exemples de dimensionnement de structure de voies de bus très fréquentées en béton, en vigueur dans différentes agglomérations françaises (structures catalogue) selon les hypothèses

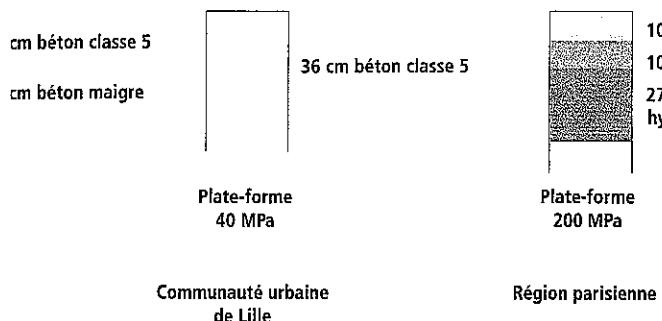
De telles structures encaissent efficacement les charges très canalisées des voies et arrêts de bus, ainsi que les sollicitations de freinage et d'accélération au voisinage et sur les arrêts. Elles supportent également bien des pressions de gonflage des pneumatiques parfois plus élevées que celles des poids lourds de marchandise. La précaution à prendre est d'éviter des dénudages chimiques ou des activations de surface trop accentuées qui pourraient altérer la cohésion de surface et présenter des difficultés en termes de nettoyabilité par les services de propreté des villes.

La figure 4 montre également une structure mixte (fondation en grève traitée aux liants hydrauliques et une couche de base en matériau bitumineux) recouverte d'un revêtement en béton de ciment mince collé (BCMC). Cette solution peut également s'appliquer pour des chaussées souples ou bitumineuses épaisses bien structurées et avec un reliquat d'enrobé suffisant du même ordre de grandeur que celui du béton.

Le BCMC enrichit la gamme des matériaux de revêtement spécifiquement mis au point pour leur faculté de résistance à l'ornière comme, par exemple, les enrobés percolés à base de résine qui sont assez couramment utilisés

Des projets innovants de transports collectifs de surface

Nouveaux besoins, nouvelles perspectives
La voie du renouveau réel



ensionnement de voies et arrêts de bus en béton
ctural design for roads and bus-stops in concrete

Les systèmes guidés sur pneus (tramway sur pneus)

On distingue, sous l'angle des sollicitations appliquées aux plates-formes, deux familles de tramway sur pneus dénommées systèmes guidés sur pneus légers et systèmes guidés sur pneus lourds. Dans le premier cas, le poids de l'essieu le plus lourd de la rame est de l'ordre de 7 à 8 t et, dans le second cas, les essieux pèsent entre 11 et 13 t. Ces systèmes sont conçus pour respecter les prescriptions du Code de la route et les règles d'application associées.

La conception des plates-formes de systèmes guidés sur pneus doit tenir compte de trois particularités ayant une incidence significative sur les structures et les revêtements :

> En termes de conception de la structure proprement dite, on doit prendre en compte les équivalences classiques en essieu de 13 t cumulées, mais aussi l'extrême rapprochement des bandes de roulement adjacentes des rames de chaque sens de circulation. Les caisses de tramways guidés sur pneus peuvent, en phase de croisement, n'être distantes l'une de l'autre que de 10 à 20 cm, ce qui signifie des entraxes des roues des deux rames qui se croisent très rapprochés (de l'ordre de grandeur du mètre - figure 5). Cela a des incidences certaines sur l'augmentation des contraintes dans les couches et, par là-même, sur le dimensionnement où la probabilité de cumul des charges côté à côté est importante, aux arrêts notamment. Les structures rigides sont sensibles aux « surcharges » de cette nature, mais dès lors que ces dernières sont bien

maîtrisées, on peut traiter très correctement ce problème en calculant les surépaisseurs optimales de béton.

> En termes de surface, il faut tenir compte de l'extrême canalisation des charges avec une répartition transversale nulle, à l'inverse de ce qui se passe sur une voie de circulation de chaussée routière. Le choix d'un revêtement particulièrement résistant à l'orniérage s'impose. C'est pour ce type d'application que des enrobés spéciaux à très haute résistance à l'orniérage ont été étudiés par la profession routière afin d'être encore plus performant sur ce registre que les meilleurs bétons bitumineux à module élevé (BBME) conformes à la norme (limite d'orniérage de 2,5 mm à 30 000 cycles au lieu de 5 mm pour les BBME).

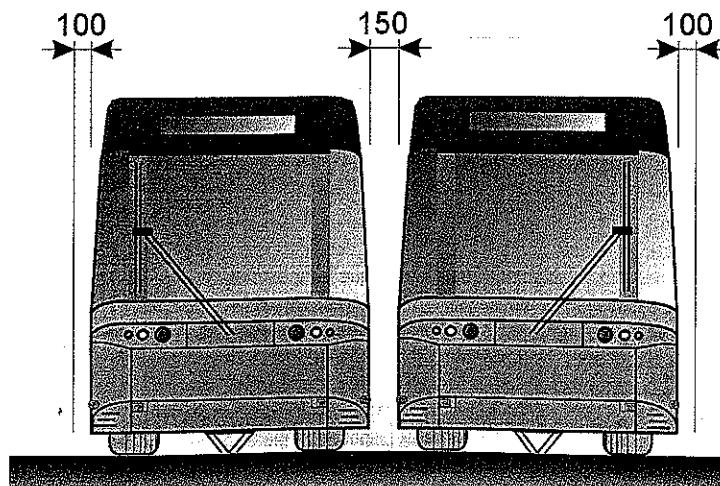
Le béton de ciment coulé et pervibré, armé, continu ou à joints goujonnés pour les tramways sur pneus lourds trouve un domaine d'application privilégié pour de telles sollicitations avec, rappelons-le, la possibilité d'allier la performance mécanique dans la durée à l'intégration au site, dès lors qu'on se limite à certains traitements qui préservent la cohésion des gravillons et du mortier de surface (photo 1). > L'insertion du dispositif de guidage dans la plate-forme est aussi une disposition constructive importante pour la conception, la réalisation et la maintenance du système.

De nombreux modes existent ou sont à l'étude, mais aujourd'hui les systèmes les plus opérationnels recourent soit à un rail de guidage central (figure 6) fixé



▲ Photo 1
Exemple de réalisation de plate-forme pour tramway sur pneus en béton pervibré

▲ Example of platform design in internally vibrated concrete for pneumatic-tired tramway



▲ Figure 5
La lame d'air entre deux véhicules circulant en sens inverse est dans cet exemple de 15 cm. Le rapprochement des essieux lourds en partie centrale de la plate-forme doit être pris en compte dans le dimensionnement de la structure.

▲ An air film between two vehicles flows in the opposite direction and, in this example, is 15 cm – Structural design must allow for the reduced clearance of heavy axles in the

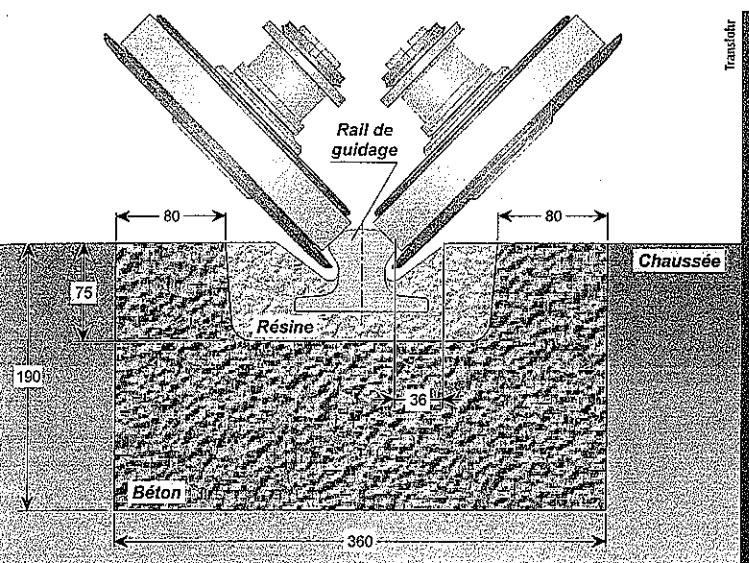


Figure 6
Exemple de rail central de guide pour un tramway sur pneus
Example of central guide rail for pneumatic-tyred tramway

ns un massif en béton, lui-même planté dans l'assise de la plate-forme, et à des bordures de guidage.

ns un cas comme dans l'autre, la technique du béton extrudé permet, avec une organisation de chantier adaptée, réaliser rapidement des ouvrages économiques et performants. De manière générale, les possibilités de moulage offrent le béton frais extrudé en font un matériau pertinent pour s'adapter aux différentes configurations des plates-formes, avec le moins de reprise d'interface possible qui constituent, au fil du temps des points délicats pour la maintenance.

Les tramways sur rails

ns quasiment toutes les conceptions réalisations de plates-formes et rails de tramway dans les villes, il y a du béton ciment dans la structure sous dispositifs d'attache et de fixation des rails. Le revêtement visible en surface est de nature diversifiée : les pavages dallages sont très prisés dans les hauts lieux de la ville. On a aussi largement recours aux matériaux bitumineux aussi qu'au béton désactivé ou imprimé.

tre les propriétés rhéologiques du matériau béton qui permet l'obtention d'un support non déformable et de recevoir les dispositifs d'ancre d'attache des rails, c'est aussi la facilité d'exécution qui, dans le contexte spécifique de la pose des rails

Le béton parce qu'il est coulé et pénétré, est le matériau qui va pouvoir épouser toutes les formes, pénétrer dans tous les volumes afin de caler et sertir les différents systèmes de support et d'attache des rails. Rappelons également que ses caractéristiques de résistance s'obtiennent sans énergie de compactage, ce qui favorise son utilisation dans les centres urbains.

On distingue globalement deux grands modes de pose de rails de tramway : la pose continue de rails généralement entrelacés et la pose discontinue sur traverse monobloc ou bilobes. Il n'est pas notre propos de comparer les avantages et limites respectives de l'une ou l'autre typologie de pose, qui s'accordent d'ailleurs chacune de nombreuses variantes. On se limitera à dire que la diversité des systèmes de pose est guidée principalement par le double souci d'une très grande précision de nivellement par le rail d'une part, et une recherche d'atténuation toujours plus exigeante dans la formation et la propagation des vibrations, d'autre part.

Contrairement à ce qu'il y paraît ou à ce que peut laisser penser l'histoire d'il y a un siècle, ou encore les pratiques étrangères des pays européens qui n'ont pas vécu comme en France les disparitions de ce mode de transport dans les villes pendant plusieurs décennies, il s'agit d'un sujet techniquement

Techniquement tout d'abord, il est question d'assurer des compromis en des conditions extrêmes, en particulier lorsque la plate-forme est soumise à des sollicitations mixtes (tramway, bus, poids lourds) insérées dans la circulation générale, ce qui est le cas d'au moins toutes les traversées des plates-formes par le réseau de voirie ordinaire.

Le rail peut, en effet, être considéré comme un réseau particulier au même titre que n'importe quel occupant du domaine public dans la voirie, mais il présente des spécificités uniques très pénalisantes pour le fonctionnement et la pérennité des revêtements, voire des assises de la plate-forme, à savoir :

> Ce réseau se développe non pas sous voirie mais en surface, au sein même des couches de la voirie les plus sollicitées mécaniquement et thermiquement et auxquelles on demande les propriétés les plus exigeantes : imperméabilisation, uni, adhérence, homogénéité, esthétique, etc.

> Ce type de réseau vit, évolue, se répare plus souvent que n'importe quel autre. Les attaches élastiques doivent être vérifiées, l'écoulement de l'eau dans les gorges des rails et aux abords de ceux-ci doit être assuré, les surfaces de roulement des rails doivent être meulées, rechargées par soudage, les joints repris, les courants vagabonds peuvent altérer les fixations et les semelles ainsi que les rails et les canalisations métalliques proches. Le rail doit-il être et peut-il être un ouvrage visitable ?

> Contrairement aux autres, ce réseau est loin d'être inerte mécaniquement. Il provoque des vibrations et surtout des poussées avec des contraintes et des déformations dans les matériaux adjacents (mouvement de rotation et/ou mouvement de translation selon le type de pose). Certains dispositifs fonctionnent avec des déflections verticales du rail au passage du tramway de plusieurs millimètres. En courbe, des poussées latérales provoquent aussi des déformations horizontales des rails d'échelle millimétrique également en cas de bonne exécution et bon entretien. Mais des déplacements centimétriques ont été observés dans le cas contraire. De tels déplacements élastiques

Les problèmes/l'avenir des transports collectifs de surface

Matériaux basiques, nouvelles technologies
La case du matériau béton

avec les déformations admissibles pour les revêtements et la structure de voirie soumise à des charges répétées.

> Ce réseau, à l'inverse de beaucoup d'autres, apparaît comme particulièrement composite, car il associe dans sa mise en place et son fonctionnement des matériaux rhéologiquement très différents, côté à côté, dessus ou dessous. On peut aussi recenser l'emploi de plusieurs types et formes d'acier, de bois, de béton, de caoutchouc, de mousse, de pierre, de sable, d'enrobés, de produits pour joints, de plastique, de colle, de résine, pour la réalisation des différentes interfaces rail-revêtement-support.

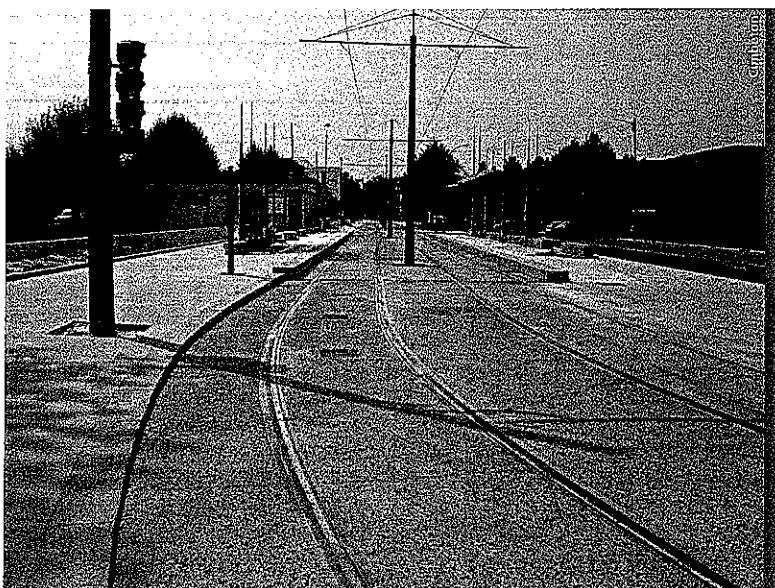
Nous comprenons immédiatement que la maîtrise des interfaces et des liaisons est essentielle pour la réussite d'un projet, bien au-delà des qualités intrinsèques pourtant nécessaires pour chacun des constituants. Il faut sûrement simplifier les systèmes et les organisations permettant une maîtrise globale du système rail/voie, faute de quoi des dysfonctionnements graves apparaissent rapidement avec un trop grand nombre de contentieux lourds, très coûteux, pour tous les partis en cause et qui altèrent l'image de ce monde des transports et du milieu professionnel vis-à-vis du grand public.

Plusieurs initiatives sont prises dans ce sens et concourent à un meilleur savoir-faire et une meilleure diffusion des précautions à prendre pour les concepteurs et réalisateurs et les exploitants. Citons à titre d'exemples non limitatifs, le groupe de travail sur les revêtements modulaires des plates-formes de tramway de l'Association des ingénieurs territoriaux de France (AITF, ex-AIVF) en lien avec le CERTU, le LROP et le bureau d'études AEP Normand, les journées d'étude (PFE) de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), les visites documentées en France et à l'étranger, les programmes de recherche et d'innovation français et européens. C'est de l'écoute et de la prise en compte mutuelle des sujétions propres aux différents métiers du rail, de la route et des composants que naîtront des dispositions constructives mieux adaptées aux contraintes particulièrement

En ce qui concerne les revêtements des plates-formes de tramway, le béton de ciment périvibré assorti de ses différents modes de traitement (désactivé, imprimé, incrusté, grenaille, sablé, voire coloré) est une réponse possible (photo 2). Les qualités du béton dans sa capacité à faire des bords francs et bien dressés, découper des joints, maîtriser les retraits et les dilatations, peuvent être mises à profit pour optimiser les interfaces entre le rail et le revêtement.

à coffrage glissant. Le rail est collé et serti à la résine dans la réservation qui lui est affectée, et différentes filières sont exploitées pour l'optimisation économique d'un tel procédé : profilés creux pour limiter la quantité de résine, nouveau type de rail bas étudié dans le cadre d'un projet européen (Cogifer) [3].

Le béton extrudé a naturellement vocation à réaliser ces profilés en béton, les machines et les produits étant



▲ Photo 2
Revêtement de plates-formes de tramway en béton désactivé
▲ Tramway platform surfacing in deactivated concrete

Quant à la question des vibrations, le béton n'est pas intrinsèquement un matériau amortissant, mais les systèmes d'isolation globale de la plate-forme (dalle flottante) règlent ce problème lorsque le bâti est très rapproché ou que l'on se situe en zone d'activités sensibles. Les éclisses en matériau absorbant limitent également, de part et d'autre du rail, la transmission des vibrations aux revêtements et aux structures.

► Vers de nouvelles conceptions

Parmi les innovations explorées de plus en plus conjointement par les professionnels de la voirie et du rail, une des idées les plus porteuses d'avenir est celle qui s'inspire de la pose continue des rails dans des profilés en béton

normalisés et certifiés au sein d'organisations professionnelles ayant, ces dernières années, beaucoup investi dans la démarche qualité (SNBPE, SPECBEA, etc.). La photo 3 illustre la réalisation d'une plate-forme de tramway en béton à la Slipform.

La simplification et l'industrialisation de ce type de pose doivent améliorer la compétitivité économique des systèmes de transport collectif sur rails, à l'heure où d'autres systèmes offrent des alternatives sérieuses. On notera aussi qu'un tel profilé peut être adapté afin de recevoir aussi toutes formes d'évidement entre les massifs longitudinaux supports de rail ainsi que recevoir tous types de revêtement, y compris des éléments modulaires qui travailleraient de ce fait dans

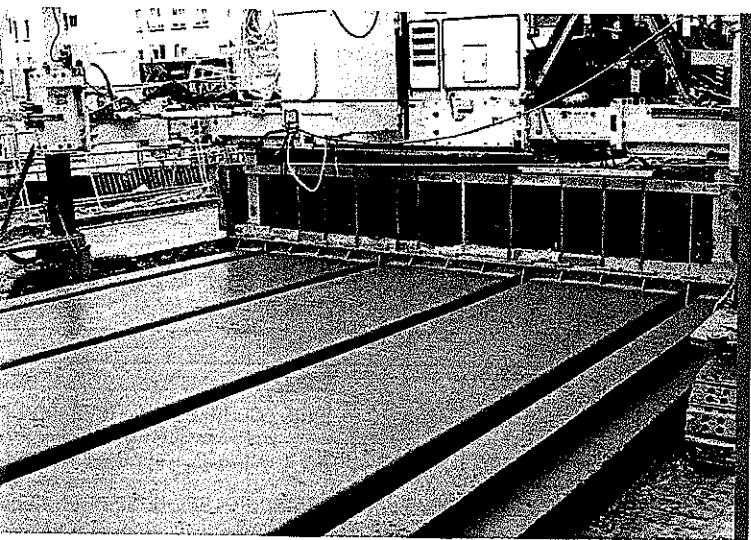


Photo 3

lipform moulant, dans le béton frais pervibré, les réservations destinées à une pose continue de rails à la résine

lipform machine leaving reservations in fresh vibrated concrete for continuous laying of rails with resin

roduction du béton poreux
des profils facilitant l'écoulement
eaux d'interface est aussi
possibilité à concréteriser.

re les innovations portant
la conception, des progrès importants
également enregistrés sur des modes
exécution de types de pose
conventionnels. Derrière une slipform
lant une dalle de béton frais, un robot
er automatiquement les selles
es ancrages de rail dans le béton
(procédé Appitack d'ALSTOM).

La machine est aussi équipée
d'un système permettant un nivellement
de précision entièrement automatisé.
La figure 7 présente une application
de ce procédé sur un site expérimental
à La Rochelle. Les cadences d'exécution
escomptées sont de 3 à 4 fois supérieures
à celles des poses classiques.

► Conclusion

Le développement des transports collectifs
de surface est une réalité incontournable
du caractère évolutif de la ville. Il est mis

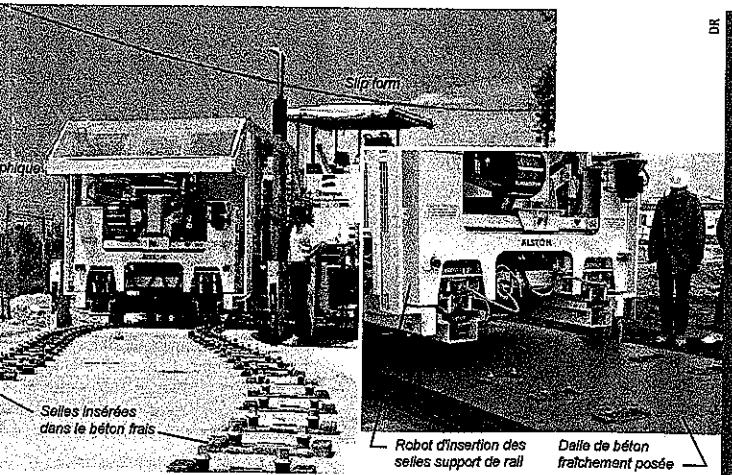


Figure 7

uiements de pose automatisée de selles supports de rails et d'ancrements dans du béton
répandu à la Slipform (procédé Appitack - ALSTOM)

omatic systems for placing rail support saddles and anchors in fresh concrete placed

en exergue aujourd'hui à la faveur
d'une volonté des autorités publiques
de parvenir à un meilleur équilibre
entre les modes de déplacement.
Les plates-formes dévolues à ces systèmes
de transport sont des signes permanents,
pour les citadins et les visiteurs de la ville,
de cette nouvelle logique : non seulement
elle réaffirme le principe du choix
et de la liberté du mode de déplacement
le plus approprié entre chaque solution
mais elle permet que ce choix existe
par une offre attractive de déplacement
en mode collectif.

La technique du béton de ciment pervibré,
comme d'autres solutions à caractère
modulaire ou continu, dispose d'avantages
importants pour concrétiser dans la durée
cette réalité d'un nouveau partage
de l'espace public, qui impose des aires
aux performances fonctionnelles et aux
qualités d'intégration particulièrement
soignées. Or, le caractère composite
de la structure comme du revêtement,
notamment dans le cas des tramways,
n'échappe à personne et pose la question
de la nécessaire juxtaposition
de nombreux produits et composants
qui peuvent s'assimiler à l'incrustation
dans la voirie de réseaux longitudinaux
très particuliers que sont les rails
ou les dispositifs de guidage
pour les tramways sur fer ou sur pneus.

Un travail de conception appréhendant
globalement le système viaire
dans une organisation permettant
la confrontation des savoir-faire routier
et ferroviaire et une clarification
des responsabilités sont nécessaires.
A cet égard, la technique du béton
de ciment très largement confronté
à la maîtrise des discontinuités
et des interfaces peut apporter
son écho pour des solutions plus simples,
plus durables et plus économiques
sans négliger pour autant les facteurs
essentiels d'intégration. ●

Bibliographie

- [1] « Infrastructures routières et espaces publics - Les techniques partagées : de nouveaux outils pour l'aménagement des territoires », RGRA n° 789, novembre 2000
- [2] « L'offre française en matière de transport public : de la desserte urbaine à la desserte régionale », CERTU-INRETS, juillet 2000
- [3] « Rails bas et appuis continus pour un tramway plus économique », Le Moniteur, juin 2001
- [4] « Guide sur la réalisation des plates-formes tramway