

CONCEPTION INNOVANTE DE LA DALLE DE VOIE EN BETON ARME CONTINU POUR LA LIGNE B DU CITYVAL DE RENNES

INNOVATIVE DESIGN OF THE CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE SLAB TRACK FOR THE RENNES METRO LINE B

Philippe Vion ; Erica Calatozzo ; Khoa Le Dang ; Mohamed Ketfi ; Jérôme Olive

SYSTRA – Paris, France

Romain Lauriot dit Prevost

SIEMENS – Lille, France

Guillaume Aliadière

SOCOTEC – Montigny le Bretonneux, France

1. RESUME

La conception de lignes de métro sur rails ou sur pneu avec dalles de voie en BA a été largement utilisée depuis de nombreuses années. À la fin des années 60 et au début des années 70, les techniciens ont envisagé d'utiliser les dalles de voie en BA seulement en tunnels en raison des conditions d'exposition, parce que la dalle est protégée des effets thermiques.

L'idée de Siemens était de concevoir une dalle de voie en béton armé continu pour voie de métro léger dans le cadre du projet Cityval, qui pourrait être mise en œuvre en plateforme et sur viaducs.

Pour le projet de Cityval, la dalle de voie continue pourrait être connectée aux viaducs en différents points, ou totalement désolidarisée du viaduc.

Le béton armé continu a été principalement utilisé en Europe et en Amérique du Nord pour des chaussées routières, appelées chaussées en béton armé continu (CBAC). Le principe des CBAC est de réaliser une chaussée en béton armée par des aciers continus sur toute sa longueur et sans joints transversaux et de maîtriser l'ouverture des fissures.

2. INTRODUCTION

La conception de lignes de métro sur pneu avec dalle de voie a été largement utilisée depuis de nombreuses années. Mais jusqu'en 1970, les techniciens ont seulement utilisé les dalles de voie en béton dans des tunnels, parce que le béton de la dalle est protégé des effets thermiques

1. ABSTRACT

The design of metro lines with rail tracks on reinforced concrete slabs and also with pneumatic tire on RC slab tracks have been widely used since many years. At the end of the 60s beginning of the 70s, railway technicians only considered using tracks on concrete slabs in tunnels due to exposure condition, because the slab is protected from the thermal effects.

The expression of need by Siemens was to develop a continuously reinforced concrete slab for light rail tracks for the Metro project Cityval, that could be implemented at ground level and on elevated structures.

For Cityval project, the continuous slab track could be connected to the viaducts in different points, or separated from the viaducts.

The continuously reinforced concrete has been mostly utilized in Europe and Northern America for road pavement, so-called continuously reinforced concrete pavement (CRCP). The principle of CRCP is to realize concrete pavement reinforced with continuous steel bars throughout its length and without transverse joints, and keeps cracks tight.

2. INTRODUCTION

The design of metro lines with pneumatic tire on slab tracks has been widely used since many years. But until the 70s, railway technicians only considered using concrete slabs tracks in tunnels, because the concrete slab is sheltered from the thermal effects and

et que le raccourcissement de la dalle résultant du retrait du béton et des variations de température est réduit, ainsi les efforts longitudinaux dans la dalle béton sont moindres que dans un tronçon aérien.

Dans le cadre du projet Neoval de la ligne b du métro de Rennes, la conception de la plate-forme prévoit la mise en œuvre d'une dalle en béton armé continu dans le but d'éviter les joints de dilatation. Le besoin exprimé par Siemens était de développer une dalle en béton armé continu pour métro léger sur pneu qui pourrait être mise en œuvre au sol, en tunnels et en viaducs.

3. ETAT DE L'ART DES DALLES BAC

La dalle en béton armé continu est caractérisée par des armatures continues dans le béton et par l'absence de joints. Au lieu d'être concentrés dans les joints de dilatation comme pour les dalles avec joints, les déformations du béton dues aux effets thermiques et aux phénomènes différés (i.e. retrait) sont réparties sur un grand nombre de microfissures distribuées le long de la dalle (Fig. 1).



Fig. 1 Répartition des fissures dans une dalle BAC / Crack distribution in CRC slab

La quantité de ferrailage longitudinal est déterminée afin de contrôler la fissuration. Le but est d'obtenir un très grand nombre de fissures avec une ouverture réduite pour assurer la continuité structurelle de la plate-forme et réaliser un transfert efficace des charges. Un des arguments principaux avancé dans l'approbation de ce type de dalle est l'absence de maintenance.

Le béton armé continu a été réalisé en Amérique du Nord et en Europe principalement sur routes au niveau du sol, appelé revêtement en béton armé continu (RBAC). Le dimensionnement structurel de la dalle (revêtement) comprend le calcul de l'épaisseur de l'enrobage et éventuellement des couches de béton et le calcul du pourcentage d'armatures à mettre en œuvre dans la dalle. L'espacement des fissures ne doit être trop élevé ou trop faible. L'espacement moyen des fissures est compris entre 1 m et 1,5 m. L'ouverture des fissures influence le taux de transfert de charges et la corrosion éventuelle des armatures dans la zone de fissuration. L'ouverture est par conséquent limitée ; en Belgique l'ouverture maximale recommandée est comprise entre 0,3 et 0,5 mm. Pour y arriver le pourcentage d'armatures recommandé varie de 0,6 à 0,7%, voire 0,8% de la section transversale de la dalle.

4. HYPOTHESES

Les principaux avantages de la dalle en béton armé continu sont l'absence totale de maintenance et le meilleur comportement à long terme. Elle présente également, du fait de l'absence de joints transversaux, une diminution de l'usure des pneus et une amélioration du confort de l'utilisateur.

deformation of slab resulting from concrete shrinkage and temperature variations is reduced, thus the longitudinal forces in concrete slab is lower than in an exposed section.

Within the scope of the Neoval project metro line b in Rennes, design of the train platform plans the implementation of a continuous concrete slab with the aim of avoiding the implementation of expansion joints. The need expressed by Siemens was to develop a continuously reinforced concrete slab track for light rail on tire that could be implemented at ground level, in tunnels and on elevated structures.

3. STATE OF THE ART OF CONTINUOUSLY RC SLAB

The continuous reinforced concrete slab is characterized by the presence of continuous reinforcement in the concrete and by the absence of transverse joints. Instead of being concentrated in expansion joints as it is the case for slab with joints, the variations of concrete volume due to the thermal effects and postponed phenomena (e.g. shrinkage) are distributed between a very large numbers of microcracks which are spread along the slab (Fig. 1).

The quantity of longitudinal reinforcement is determined so as to control cracking. The purpose is to obtain a very large number of cracks with a reduced opening to assure the structural continuity of the cover and to realize an effective transfer of loads. One of the main arguments moved forward in approval of this type of pavement is the almost total absence of maintenance.

The continuously reinforced concrete has been realized in North America and in Europe mainly for roads at ground level, so-called continuously reinforced concrete pavement (CRCP). The structural sizing of the slab (pavement) contains the calculation of the thickness of the cover and eventually of the road layers and the calculation of the percentage of reinforcement to be implemented in the slab. The spacing of cracks does not have to be too high or too low. The average spacing of cracks recommended is included between 1 m and 1.5 m. The opening of cracks influences the degree of transfer of load and the possible corrosion of the reinforcement in the cracks zone. The opening is thus limited; in Belgium a recommended maximal opening is comprised between 0.3 and 0.5 mm. To do it, the recommended percentage of reinforcement varies from 0.6 to 0.7 %, even 0.8 % of the slab transverse section.

4. HYPOTHESIS

The main advantages in favor of the continuously RC slab are the almost total absence of maintenance and the best long-term behavior. It presents also, due to the absence of transverse joints, a decrease of tires wear and an improvement of passenger comfort.

4.1 Géométrie de la dalle de voie

La géométrie d'une dalle de métro automatique sur pneu est une dalle en béton monolithique de 3 m de largeur, 0,90 m au niveau de la surface de roulement et 1,20 m dans la zone intermédiaire (Fig. 2).

L'épaisseur de la dalle est respectivement de 0,25 m sous la surface de roulement et 0,15 m dans la zone centrale. La dalle est équipée d'un rail de guidage de type LRS. Le rail de guidage et ses dispositifs de fixation sont placés dans une engravure centrale de la dalle (Fig. 3).

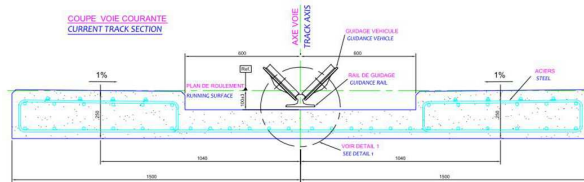


Fig. 3 Géométrie du rail de guidage / Guide rail geometry

4.2 Matériel roulant

L'interface pneu/voie définit la largeur de bande de roulement dynamique sur laquelle vient s'appliquer la charge roulante. La largeur statique du pneu est de 500 mm.

Tableau 1
Efforts fréquents de calcul par essieu

Direction	Force / essieu (en kN)	Localisation
X	+/-19.024	En tout point
Y	6.210	En alignement droit
	22.670	En courbe (1.3 m/s ²)
	23.816	En APV
Z	144.925	En ligne (Alignement droit ou courbe)
	167.353	En APV

Les charges appliquées à la dalle de voie par le métro léger sont récapitulés ci-dessus (Tableau 1) ; ces valeurs correspondent à la charge fréquente, elles ne prennent pas compte les effets du vent, ni le coefficient de majoration dynamique.

Le train pris en compte pour le calcul est composé de trois voitures (triplet). La configuration de convoi fréquent est montrée ci-après (Fig. 4).

Le coefficient dynamique est pris égal à 1,29 pour l'étude de la dalle de voie. La force de freinage considérée pour la justification de la dalle est constituée de deux triplets en freinage d'urgence ; la force horizontale appliquée pour une voie est de 825,6 kN (12 essieux x 68,8 kN/essieu pour une longueur totale de convoi de 64,6 m).

4.1.Slab track geometry

The geometry of one track for automatic metro on tire is a monolithic concrete slab 3 m in width, 0.90 m under the rolling surfaces and 1.2 m in the intermediate zone (Fig. 2).

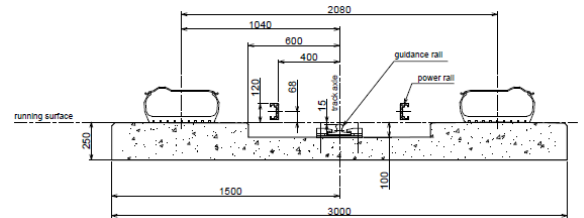


Fig. 2 Section générale d'une dalle de voie / Overall section of one slab track

The thickness of the slab is respectively 0.25 m under the rolling surfaces and 0.15 in the intermediate zone. The slab is equipped with a guide rail which is a continuous welded rail. The guide rail and its fixing device are located in a central notch of the slab (Fig. 3).

4.2.Rolling stock

The interface tire/track defines the bandwidth of dynamic tread on which the rolling load is applied. The static width of the tire is 500 mm.

Table 1
Frequent train loads for design

Direction	Force / axle (in kN)	Location
X	+/-19.024	Everywhere
Y	6.210	In straight line
	22.670	In curve (1.3 m/s ²)
	23.816	In switch
Z	144.925	In line (Straight line or curve)
	167.353	In switch

The loads applied to the slab track by the light train are recapitulated above (Table 1); these values do not take into account the effects of the wind, nor the dynamic coefficient.

The train taken into account for design is composed of three coaches (triplet). The configuration of frequent convoy is shown below (Fig 4).

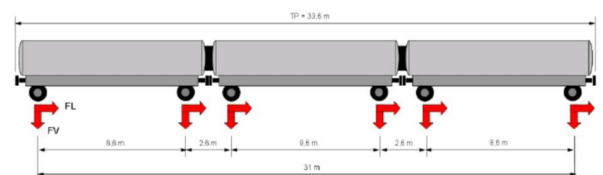


Fig. 4 Convoi de calcul / Design train

La force de freinage considérée pour la justification de l'ouverture des fissures est un « triplet » en freinage de service ; la force horizontale appliquée pour une voie est de 122,4 kN (6 essieux x 20,4 kN/essieu).

4.3 Ouvrages de génie civil

Le génie civil est composé d'une succession de viaducs élémentaires à deux travées, chaque travée étant comprise entre 31 et 40 m. Le tablier est un caisson en béton précontraint avec des nervures transversales. La hauteur du tablier est constante de 1,6 m, et le hourdis supérieur fait 8,5 m de large.

5. PRINCIPE DE CONCEPTION

Le principe était de trouver une solution de dalle de voie fonctionnant de façon continue sur une longueur importante et bloquée à ses extrémités, pouvant s'adapter à la maîtrise de la fissuration sous déformation gênée. La dalle de voie peut être mise en place en plateforme (au sol) ou sur ouvrage (en élévation). Le retrait du béton ou les variations de température peuvent être à l'origine de déformation gênée ; ces effets peuvent générer des efforts de traction dans le béton. Ainsi, les armatures sont absolument nécessaires pour maîtriser la fissuration sous ces effets.

La dalle peut être partiellement ou totalement bloquée en fonction des conditions aux limites (Fig. 5). Dans le cas d'une dalle sur viaducs, la dalle peut être bloquée au moyen de bèches dans le remblai situé derrière la culée et encastrée, totalement ou partiellement, dans une pile/culée. En considérant un état de fissuration du béton de la pile/culée et la souplesse relative du support, le blocage d'extrémité peut être assoupli.

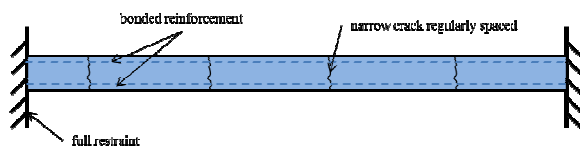


Fig. 5 Contrôle de la fissuration sous déformation gênée / Control of cracking with restraint deformation

La longueur de la dalle de voie sur viaduc n'est pas limitée, comme pour le projet de la ligne b du métro de Rennes où la longueur totale est de 2400 m. Par conséquent, le nombre de viaduc élémentaires est de 36 ; avec 34 viaducs à deux travées et deux travées isostatiques.

5.1 Différentes configurations

L'étude de faisabilité a été menée selon différentes configurations qui résultent des concepts théoriques. Trois configurations de la dalle de voie sur viaduc ont été étudiées : une dalle de voie continue désolidarisée ; une dalle de voie rendue continue et partiellement solidarifiée ; une dalle de voie discontinue et solidarifiée.

The dynamic coefficient is taken equal to 1.29 for the slab study. The braking force considered for slab justification will be two triplets in emergency braking; the applied horizontal force to one track is 825.6 kN (12 axles x 68.8 kN/axle for a convoy total length of 64.6m). The braking force for crack opening justification will be one triplet in service braking; the applied horizontal force to one track is 122.4 kN (6 axles x 20.4 kN/axle).

4.3. Civil engineering construction

The civil engineering consists of a succession of elementary viaducts made of two spans, each comprised between 31 and 40 m. The deck is a prestressed concrete box-girder with transverse ribs. The deck height is constant equal to 1.6 m, and the upper slab is 8.5 m in width.

5. DESIGN CONCEPT

The concept was to find a solution for a slab track, running continuously on an important length and fixed at each end, that will cope with cracking control under restrained deformation. The slab track could be implemented on platform or on viaduct. Concrete shrinkage or temperature variations can be the origin of restrained deformation; these effects can produce tensile stresses in concrete. Thus, steel reinforcement is absolutely necessary to control cracking under these effects.

The slab could be totally or partially restrained depending on the boundary conditions (Fig. 5). In the case of a slab on viaducts, the slab could be embedded by mean of spuds in the backfill behind the abutment and embedded, totally or partially, in a pier/abutment. Assuming cracked condition for concrete in the pier and/or flexibility of the support, the end restraint could be reduced.

The length of the slab track on viaduct is not restricted, as we will see in the Rennes line b project where the total length is 2400 m. Consequently for this project, the number of elementary viaducts is 36; with 34 viaducts composed of two spans and 2 isostatic spans.

5.1. Different configurations

The feasibility study was led according to various configurations consequent upon theoretical concepts. Three configurations of slab track on viaducts were studied: a continuous separated slab track; a continuous slab track partially connected; a discontinuous slab track connected.

In the first configuration, the continuous separated slab rests on the viaduct through a sliding complex and is blocked at the end. The slab is extruded concrete and reinforcement is continuous.

Dans la première configuration, la dalle de voie continue et désolidarisée repose sur le viaduc par l'intermédiaire d'un complexe de glissement et est bloquée à ses deux extrémités. La dalle est en béton extrudé et armé de façon continue.

Dans la seconde configuration, la dalle de voie continue et partiellement solidarifiée est faite de tronçons reliés à l'aide de clavages en béton coulé en place. La dalle repose sur le viaduc par l'intermédiaire d'un complexe de glissement et est bloquée au niveau de l'appui intermédiaire par des douilles de fixation. La dalle est en béton extrudé et le ferrailage n'est pas continu, avant de couler le clavage des coupleurs mécaniques sont mis en œuvre entre les armatures afin d'obtenir une contrainte nulle dans les armatures à la température de référence.

Dans la troisième configuration, la dalle de voie discontinue est solidarifiée par l'intermédiaire d'ancrages situés le long des viaducs. La dalle est réalisée en tronçons positionnés sur chaque viaduc élémentaire.

La première solution a été étudiée afin de vérifier si les idées définies dans les références bibliographiques pouvaient être transposées au nouveau concept. L'étude de faisabilité a montré qu'il était possible de réaliser une dalle BAC sur un viaduc pouvant se déplacer librement.

5.2 Approche globale

La maîtrise de la fissuration et le calcul des armatures longitudinales dans la dalle sont basés sur la norme Européenne EN 1992-1-1. Le comportement des fissures est étudiée dans la dalle soumise à des efforts de traction sous déformation imposée ou gênée (retrait ou variations de température) conformément au §7.4.3. L'ouverture des fissures est calculée selon la norme EN 1992-1-1 §7.3.4.

Ces calculs permettent d'établir la fissuration, d'estimer l'effort de traction dans la dalle et l'ouverture des fissures dans le cas de déformation gênée. La figure suivante montre un exemple de création et d'ouverture de fissures dans une dalle en béton C30/37 (25 cm x 100 cm), avec un taux de ferrailage de 1,15%.

Cette figure montre que l'effort de traction dans la dalle est borné à la contrainte de la force minimale créant la fissure (Fig. 6). Après la première fissuration (premier sommet), la force décroît brutalement à cause de la modification de la raideur apparente du béton de dalle. Si la déformation continue d'augmenter, la force dans la dalle augmente jusqu'à ce qu'une nouvelle fissure apparaisse. Ce phénomène continue jusqu'à stabilisation (la déformation relative est égale à 0,0085).

Une étude paramétrique a été réalisée pour une dalle de 25 cm d'épaisseur dans le cadre de ce concept pour vérifier la relation entre le pourcentage d'armatures et la valeur maximum d'ouverture des fissures.

Pour le projet de métro léger sur pneu, pour favoriser le déplacement relatif entre la dalle BAC et les viaducs, particulièrement sous variation de température, et ainsi limiter les efforts engendrés dans les viaducs, un complexe de glissement est placé à l'interface.

In the second configuration, the continuous slab track partially connected is made of segments joint together by in-situ cast concrete. The slab rests on the viaduct through a sliding complex and is blocked at one end by means of stopper clutch. The slab is realized in extruded concrete and reinforcement is not continuous, and when realizing the joint reinforcement mechanical couplings are operated to obtain a nil stress in the slab at the reference temperature.

In the third configuration, the discontinuous slab track is connected by means of anchoring located all along the viaducts. The slab is realized in segments placed on each elementary viaduct.

The first solution was studied in order to verify if the characteristics already observed in the bibliographic references could be transposed to the new concept. The feasibility study shows that adaptation was possible to provide a continuously RC slab for a track with an underlying viaduct which can move freely.

5.2.Global approach

The control of cracking and the design of longitudinal reinforcement in the slab are based on the European standard EN 1992-1-1. The cracking behaviour is studied in the reinforced concrete slab submitted to tensile stress resulting from imposed or restrained deformation (concrete shrinkage or temperature variations) according to §7.4.3. The opening of cracks is calculated conferring to EN 1992-1-1 §7.3.4.

These calculations allow establishing generation of cracks, to estimate the tensile force in the slab and the opening of cracks according to the imposed or restrained deformation. The following figure shows an example of the generation and the opening of cracks in a concrete slab C30/37 (25cm x 100cm), with a reinforcement ratio of 1.15 %.

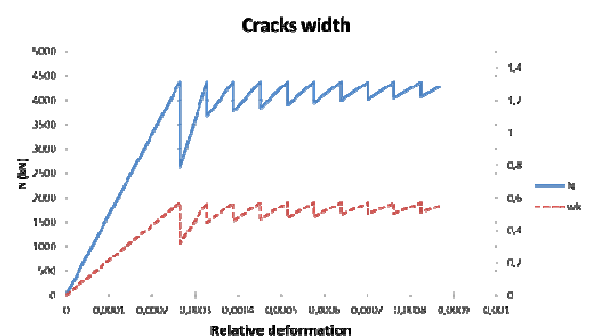


Fig. 6 Ouverture de fissure et traction dans la dalle / Crack width and variation of tensile force in slab

This figure shows that the tensile force in the slab has for limit the strength of minimal force creating the crack (Fig. 6). After the first crack (first summit), the force in the slab brutally decreases because of the change of concrete slab effective stiffness. If the deformation continues to increase, the force in the slab increases

5.3 Complexe de glissement

Le complexe de glissement proposé pour désolidariser la dalle de voie des viaducs est constitué d'une membrane en PEHD de 1 mm d'épaisseur entourée de deux géotextiles en polypropylène de 2 à 2,5 mm d'épaisseur. Le géotextile inférieur est collé sur l'étanchéité.

Ce type de complexe de glissement a été utilisé pour la dalle support de voie du génie civil de la LGV Pékin-Tianjin construit en 2006. Le concept développé par Bögl était une dalle support constituée de tronçons individuels préfabriqués, de 80 à 100 m de long, placés l'un derrière l'autre et reliés par un béton de clavage coulé en place. Entre les tronçons préfabriqués l'ancrage des armatures est réalisé à l'aide de coupleurs mécaniques.

5.4 Calcul forfaitaire selon les Eurocodes

Ce paragraphe présente le calcul de l'ouverture des fissures dans la dalle en béton soumise aux efforts de traction issu de déformation gênée selon la norme EN 1992-1-1 §7.4.3 et §7.3.4.

Hypothèses sur la géométrie et les matériaux : aire de la section (une dalle) 0,63 m² ; béton C30/37 ; $f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2,9$ MPa ; date de la fissuration 28 jours ; armatures $\phi 16$ limite $f_{yk} = 500$ MPa, ration 1,15% = 72,4 cm² ; espacement $s = 150$ mm (deux nappes) , enrobage $c = 60$ mm.

L'enrobage vaut 60 mm > 45 mm obtenu pour une durée de vie de 100 ans.

Ouverture des fissures sous combinaison quasi-permanente

La contrainte maximale autorisée dans les armatures immédiatement après fissuration est :

$$\sigma_s = k_c \times k \times f_{ct,eff} \times A_{ct} / A_s$$

$k_c = 1.0$ en traction pure et deux nappes symétriques

$k = 0.65$ pour la fissuration due aux déformations gênées

L'effort normal de traction pour une dalle est :

$$N = - k \times f_{ct,eff} \times A_{ct} = - 0.65 \times 2.9 \times 0.63 = - 1.19 \text{ MN}$$

Pour la fissuration due aux déformations gênées, la contrainte maximum est :

$$\sigma_s = k_c \times k \times f_{ct,eff} \times A_{ct} / A_s = 0.65 \times 1.0 \times 2.9 \times 0.63 / 0.724 \times 10^{-2} = 164 \text{ MPa.}$$

Selon la NF EN 1992 NA §7.4.3 (2): $k_3 = 3.4(25/c)^{2/3} = 1.9$

Espacement :

$$s_{r,max} = k_3 \times c + 0.425 \times k_1 \times k_2 \times \varnothing / \rho_{p,eff} = 1.9 \times 60 + 0.425 \times 0.8 \times 1.0 \times 16 / 1.15\% = 587 \text{ mm}$$

Ouverture des fissures $w_k = s_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \max [(\sigma_s - k_t \times f_{ct,eff} / \rho_{p,eff} \times (1 + \alpha_e \times \rho_{p,eff})) / E_s ; 0,6$$

until the following cracks appear. This phenomenon continues until stabilization (the relative deformation is 0.0085).

A parametric study for a slab 25 cm thick has been realized within the scope of this concept to see the relation between the reinforcement ratio (percentage) and the maximum cracks width.

For the light rail project on tire, to allow the relative displacements between the continuous concrete slab track and the viaducts, in particular under temperature variation, and so limit the efforts created in the viaducts, a sliding complex is installed in the interface

5.3.Sliding layer

The sliding layer proposed to separate the slab track from viaducts consists of a HDPE membrane 1 mm in thickness sandwiched between two polypropylene geotextiles comprised between 2 to 2.5 mm in thickness. The lower geotextile is stuck on the waterproofness.

This type of anti-friction layer was used for the concrete strip supporting the solid track of the civil engineering for HSR Beijing-Tianjin in 2006. The concept developed by Bögl was a concrete strip made of individual prefabricated segments, 80 to 100 m in length, placed next to each other and connected together with in-situ cast concrete. Between the prefabricated segments the reinforcement anchorage is being realised by mean of mechanical couplings.

5.4.Calculation according to European standard

This paragraph presents the design of the concrete slab cracks width submitted to tensile stress resulting from restrained deformation according to EN 1992 1.1 §7.4.3 and §7.3.4.

Hypothesis on geometry and materials: cross section area (one slab) 0.63 m²; concrete C30/37; $f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2,9$ MPa; date of cracking 28 days; reinforcement $\phi 16$ yield $f_{yk} = 500$ MPa, reinforcement ratio 1.15% = 72.4 cm²; spacing $s=150$ mm (two layers); cover $c = 60$ mm.

The cover is 60 mm > 45 mm obtain for a service life of 100 years.

Cracks width under quasi-permanent combination

The maximum stress permitted in the reinforcement immediately after cracking is:

$$\sigma_s = k_c \times k \times f_{ct,eff} \times A_{ct} / A_s$$

$k_c = 1.0$ for pure tension and two symmetrical layers

$k = 0.65$ for cracking cause by restraint

The axial force (tension) for one slab is:

$$N = - k \times f_{ct,eff} \times A_{ct} = - 0.65 \times 2.9 \times 0.63 = - 1.19 \text{ MN}$$

For cracking caused by restraint, the maximum stress is:

σ_s / E_s] [EC2-1-1 Expr.(7.9)]

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \max [(164.0 - 0.4 \times 2.9 / 1.15\% \times (1 + 6.1 \times 1,15\%)) / 200000 ; 0.6 \times 164.0 / 200000] = \max [0.280 \text{ mm/m} ; 0.492 \text{ mm/m}] = 0.492 \text{ mm/m}$$

$$w_k = 587 \times 0.492 \times 10^{-3} = 0.289 \text{ mm}$$

Ouverture des fissures sous combinaison fréquente

La variation de contrainte sous freinage de service est :

$$\Delta\sigma_s = F_s / A_s = 0.1224 / 0.724 \times 10^{-2} = 16.9 \text{ MPa}$$

La contrainte sous combinaison fréquente est alors :

$$\sigma_s + \Delta\sigma_s = 164 + 16.9 = 180.9 \text{ MPa}$$

$$\text{Espacement} = 587 \text{ mm}$$

$$\text{Ouverture des fissures } w_k = 587 \times 0.543 \times 10^{-3} = 0.319 \text{ mm}$$

En conclusion, avec un taux de ferrailage de 1,15% et un enrobage de 60 mm, on obtient une ouverture de fissure **sous combinaison fréquente de 0,319 mm**. Cette valeur est légèrement supérieure à la valeur conventionnelle applicable pour les structures BA pour une classe d'exposition XC4 ($w_{max} = 0,30 \text{ mm}$), mais c'est acceptable.

Effort dans la dalle sous combinaison caractéristique

L'effort dans la dalle sous combinaison caractéristique est obtenu à partir du taux de contrainte dans les armatures augmenté de l'effort sous combinaison fréquente, l'incrément de température de -10°C jusqu'à -23°C (valeur caractéristique) et l'incrément dû au freinage (valeur caractéristique).

L'augmentation de l'effort due à la température, avec un module d'Young à long terme $E_d = 10945 \text{ MPa}$ est :

$$N = E_s \times \alpha \times \Delta t^\circ = 10945 \times 1.26 \times 10^{-5} \times 13 = 1.79 \text{ MN which result in } \Delta\sigma_s(\Delta t^\circ) = 123 \text{ MPa}$$

Pour deux dalles l'effort sous combinaison caractéristique est :

$$N = ((\sigma_s + \Delta\sigma_s) + \Delta\sigma_s(\Delta t^\circ) + \Delta\sigma_s(\text{brake})) \times A_s = (180.9 + 123 + 35) \times 0.724 \times 10^{-2} \times 2 = 4.91 \text{ MN}$$

En conclusion, avec un taux de ferrailage de 1,15%, l'effort de traction dans la dalle **sous combinaison caractéristique est borné à 4,91 MN**.

6. MODELES DE CALCUL

Le programme aux éléments finis SOFISTIK a été utilisé pour l'étude de la dalle BAC sur viaduc. Les calculs des efforts sont menés en analyse non linéaire pour les effets élémentaires et sous combinaisons fréquente et caractéristique, afin de déterminer les efforts normaux dans la dalle, les efforts de soulèvement sous charges variables et les réactions dans les appuis des viaducs élémentaires.

$$\sigma_s = k_c \times k_{ct,eff} \times A_{ct} / A_s = 0.65 \times 1.0 \times 2.9 \times 0.63 / 0.724 \times 10^{-2} = 164 \text{ MPa.}$$

According to NF EN 1992 NA §7.4.3 (2): $k_3 = 3.4(25/c)^{2/3} = 1.9$

Spacing:

$$S_{r,max} = k_3 \times c + 0.425 \times k_1 \times k_2 \times \varnothing / \rho_{p,eff} = 1.9 \times 60 + 0.425 \times 0.8 \times 1.0 \times 16 / 1.15\% = 587 \text{ mm}$$

$$\text{Crack width } w_k = S_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}):$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \max [(\sigma_s - k_t \times f_{ct,eff} / \rho_{p,eff} \times (1 + \alpha_e \times \rho_{p,eff})) / E_s ; 0.6 \sigma_s / E_s] \text{ [EC2-1-1 Expr.(7.9)]}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \max [(164.0 - 0.4 \times 2.9 / 1.15\% \times (1 + 6.1 \times 1,15\%)) / 200000 ; 0.6 \times 164.0 / 200000] = \max [0.280 \text{ mm/m} ; 0.492 \text{ mm/m}] = 0.492 \text{ mm/m}$$

$$w_k = 587 \times 0.492 \times 10^{-3} = 0.289 \text{ mm}$$

Cracks width under frequent combination

For cracking cause by restraint, the maximum stress is:

The stress variation under service braking force is:

$$\Delta\sigma_s = F_s / A_s = 0.1224 / 0.724 \times 10^{-2} = 16.9 \text{ MPa}$$

The stress under frequent combination is:

$$\sigma_s + \Delta\sigma_s = 164 + 16.9 = 180.9 \text{ MPa}$$

$$\text{Spacing} = 587 \text{ mm}$$

$$\text{Crack width: } w_k = 587 \times 0.543 \times 10^{-3} = 0.319 \text{ mm}$$

In conclusion, with a reinforcement ratio of 1.15% and a 60 mm cover, the crack width obtain **for frequent combination is 0.319 mm**. This value is slightly above the conventional value applicable to the RC structures for a class of exposure XC4 ($w_{max} = 0.30 \text{ mm}$), but it is acceptable.

Effort in the slab under characteristic combination

The effort in the slab under characteristic combination is obtained from the stress rate in the reinforcement, adding to the effort under frequent combination, the increment due to temperature from -10 °C up to -23°C (characteristic value) and the increment due to braking (characteristic value)

The increment effort due to temperature, with a long term young modulus $E_d = 10945 \text{ Mpa}$, is:

$$N = E_s \times \alpha \times \Delta t^\circ = 10945 \times 1.26 \times 10^{-5} \times 13 = 1.79 \text{ MN which result in } \Delta\sigma_s(\Delta t^\circ) = 123 \text{ MPa}$$

For two slabs effort under characteristic combination is:

$$N = ((\sigma_s + \Delta\sigma_s) + \Delta\sigma_s(\Delta t^\circ) + \Delta\sigma_s(\text{brake})) \times A_s = (180.9 + 123 + 35) \times 0.724 \times 10^{-2} \times 2 = 4.91 \text{ MN}$$

Différents modèles ont été étudiés : un modèle générique en alignement droit à six travées (3 viaducs élémentaires) ; deux modèles génériques en courbe à quatre travées (rayons de 126 m et de 100 m) ; un modèle spécifique avec le tracé en plan du projet en alignement droit et en courbe (rayon de 100 m) ; un modèle spécifique avec le tracé en plan exact d'une longueur de 1200 m.

Les modèles prennent en compte la rigidité de la dalle continue fissurée et le coefficient de frottement du complexe de glissement. Le comportement de la dalle fissurée est expliqué ci-dessus, le pourcentage d'armatures est de 1,15%, l'aire de la section transversale est 1,26m², et l'espacement des fissures est de 0,5 m ; des ressorts non linéaires caractérisent le frottement entre le tablier du viaduc et la dalle continue (Fig. 7).

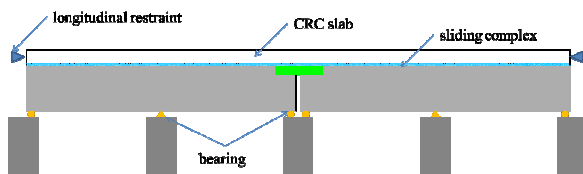


Fig. 7 Schéma de principe du modèle / Principle sketch of the model

Un modèle 3D à barres a été réalisé pour chaque étude, modèle générique en alignement droit (Fig. 8), modèle spécifique en courbe (Fig. 9), etc...

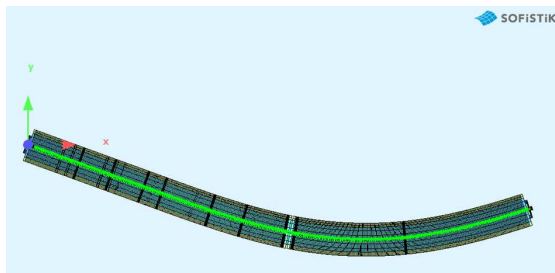


Fig. 9 Vue en plan du modèle spécifique en courbe / Plan view of specific model in curve

Les efforts normaux dans la dalle ont été calculés sous poids propre, retrait, température et charges roulantes. Le retrait de la dalle est pris en compte sur une période comprise entre 90 jours et l'infini. On considère que l'encastrement est achevé à chaque extrémité après le bétonnage de la dalle de voie qui prend environ 90 j.

La température est initiée sous les effets à long terme et à court terme. Il a donc été décidé de prendre une valeur de module d'Young intermédiaire au prorata des deux effets, une valeur de 15 000 MPa a été retenue.

Les effets de température sont les suivants :

Temperature in °C	Rail	Slab track	Viaduct
ΔTmax	+ 45°	+ 35°	+ 27°
ΔTmin	- 35°	- 23°	- 17°

Les effets de charges roulantes (y compris le freinage) sont considérés en différents emplacements pour obtenir

In conclusion, with a reinforcement ratio of 1.15%, the tensile force in the slab for characteristic combination is bounded above by 4.91 MN.

6. DESIGN MODELS

The finite element software SOFISTIK has been used for the study of the continuous slab track on viaduct. The calculations are realized in nonlinear analysis for the elementary effects and under the frequent and characteristic combinations, to determine horizontal efforts in the slab track, uplift forces under live loads and reactions in the viaduct supports.

Different models were studied: a generic model in straight line with six spans (3 elementary viaducts); two generic models in curve with four spans (radius 126m and 100m); a specific model with exact layout in straight line and curve (radius 100 m); a specific model with exact layout on a 1200 meter length.

Models take into account rigidity of the continuous cracked slab and friction coefficient of the sliding complex. The behaviour of the cracked slab is explained above, reinforcement ratio is 1.15%, cross-sectional area is 1.26 m², and cracks spacing is 0.5 m; nonlinear springs characterize the friction between the viaduct deck and the continuous slab (Fig. 7).

A 3D wire frame model was constructed for each study, generic model in straight line (Fig. 8), specific model in curve (Fig. 9), etc...

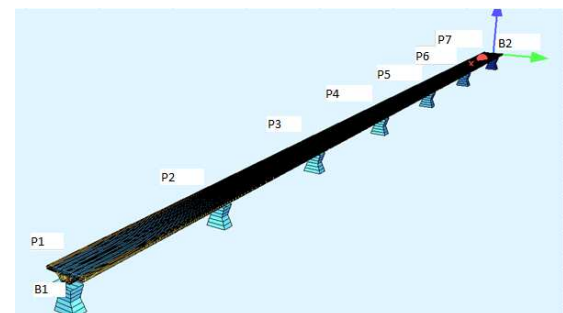


Fig. 8 Vue générale du modèle SoFiStick en AD / General view of SoFiStick model in straight line

The horizontal axial efforts in the slab track were calculated under dead load, shrinkage, temperature and live loads.

The slab track shrinkage is taken into account in a period comprised between 90 days to infinity. We consider embedding is realised at each end after concreting the slab track which takes around 90 days.

The temperature is initiated both by long term and short term effects. It was then decided to take an intermediate young modulus value for the slab track as a pro rata of both effects, a value of 15 000 MPa has been given.

The temperature effects taken into account are given in the table.

les efforts normaux et les soulèvements dans la dalle

Comme précisé au §4.4, l'effort normal de traction dans la dalle est borné à la fissuration du béton sous déformation gênée, le seuil est de 4,91 MN en caractéristique.

Une loi de comportement linéaire a été adoptée pour la dalle de voie en approche intermédiaire, de ce fait les charges de température et de retrait doivent être pondérées par un coefficient 0,65, pour la fissuration sous déformation gênée. Pour le cas où une loi de comportement non linéaire est choisie un seuil en traction doit être appliqué.

Résultats

Les principaux résultats dans la dalle sous combinaison caractéristique sont : 3802 kN en traction borné à 4910 kN ; -3343 kN en compression ; effort de soulèvement compris entre 20 et 60 kN/m sur un côté de la dalle.

7. CONCLUSION

La conception de lignes de métro sur pneu avec dalle de voie a été largement utilisée depuis de nombreuses d'années, mais principalement dans des tunnels, parce que la dalle en béton est abritée des effets thermiques et que la déformation générée par le retrait du béton et les variations de température est réduite, comparées aux tronçons exposés en plate-forme et en élévation.

Dans le cadre du projet Neoval pour la ligne b du métro de Rennes, la conception de la voie prévoit la mise en œuvre d'une dalle en béton armé continu pour le métro léger sur pneu à la fois au niveau du sol, dans des tunnels et sur les viaducs.

Le concept devait étudier une solution de dalle de voie, fonctionnant de façon continue sur une longueur importante et bloquée à ses extrémités, et pouvant s'adapter à la maîtrise de la fissuration sous déformation gênée. Le retrait du béton ou le raccourcissement dû à la température peuvent être à l'origine de déformation gênée générant des contraintes de traction dans le béton, exigeant la mise en œuvre d'armatures pour contrôler la fissuration.

Le contrôle de la fissuration et la justification du ferrailage longitudinal dans la dalle sont basés sur la norme européenne EN 1992-1-1. Le ferrailage est étudié sous contraintes de traction résultant de déformation imposée ou gênée selon §7.4.3. L'ouverture des fissures est calculée selon la norme EN 1992-1-1 §7.3.4.

Pour permettre les déplacements relatifs entre la dalle BAC et les viaducs, en particulier sous les variations de température, et donc limiter les efforts générés dans les viaducs, un complexe de glissement est mis en œuvre à l'interface entre le tablier et la dalle.

L'effort normal de traction global dans la dalle est limité à la fissuration du béton sous déformation gênée, le seuil pris en compte sous combinaison caractéristique est de 4910 kN.

The train effects (including braking) are considered in different locations to get the axial forces and the uplift forces in the slab track.

As it has been described above (§4.4), in tension the global axial effort in the slab track is limited to the concrete cracking under restraint deformation, the threshold for characteristic combination is 4.91 MN.

A linear behaviour law has been taken into account for the slab track as an intermediate approach, therefore the loads due to temperature reduction and shrinkage must be understated by a coefficient $k=0.65$, for cracking caused by restraint deformation. In case a nonlinear behaviour law is preferred a threshold in tension must be applied.

Results

The main results in the slab for characteristic combination: 3802 kN in tension bounded above by 4910 kN; -3343 kN in compression; lifting effort comprised between 20 kN/m and 60 kN/m for one side of the slab (depending on the track layout).

7. CONCLUSION

The design of metro lines with pneumatic tire on slab tracks has been widely used since many years, but mainly in tunnels, because the concrete slab is sheltered from the thermal effects and deformation of slab resulting from concrete shrinkage and temperature variations is reduced, compared to exposed sections in platform and elevated structures.

Within the scope of the Neoval project metro line b in Rennes, design of the train platform plans the implementation of a continuously reinforced concrete slab track for light rail on tire that could be implemented at ground level, in tunnels and on elevated structures.

The concept was to develop a solution for a slab track, running continuously on an important length and fixed at each end, that will cope with cracking control under restrained deformation. Concrete shrinkage or temperature reduction can be the origin of restrained deformation producing tensile stresses in concrete, requiring the implementation of steel reinforcement to control cracking.

The control of cracking and the design of longitudinal reinforcement in the slab are based on the European standard EN 1992-1-1. The reinforcement is studied under tensile stress resulting from imposed or restrained deformation according to §7.4.3. The opening of cracks is calculated conferring to EN 1992-1-1 §7.3.4.

To allow the relative displacements between the continuous concrete slab track and the viaducts, in particular under temperature variation, and so limit the efforts created in the viaducts, a sliding complex is installed in the interface between deck and slab.

In tension the global axial effort in the slab track is limited to the concrete cracking under restraint deformation, the threshold considered for characteristic combination is 4910 kN.