

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

division Matériaux et Structures de chaussées

Laboratoire Régional de l'Est Parisien – Le Bourget

Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien - Trappes

ETUDE DE STRUCTURES DE PLATE-FORME POUR TRAMWAYS SUR PNEUS

Partie 1 : Etude générique, formulations d'hypothèses
et dimensionnement

Rapport 1-2 : Dimensionnement des structures en béton
Rapport d'étude, Version 3.00

Document établi par :

J.-M. Balay (LCPC)
P. Cochet (LREP)
L. Grin (LROP)

SOMMAIRE

I- TYPE DE STRUCTURES ETUDIEES	3
I-1 Commentaires sur les structures bitumineuses : rappel du rapport n°1-1	3
I-2 Choix de la structure rigide en dalles goujonnées	4
I-2-1 Avantages du BAC et inconvénients des dalles goujonnées.....	4
I-2-2 Avantages des dalles goujonnées et inconvénients du BAC.....	5
II- HYPOTHESES ET DONNEES POUR LE DIMENSIONNEMENT.....	6
II-1 Démarche de calcul.....	6
II-2 Données pour le dimensionnement.....	6
III- DIMENSIONNEMENT.....	7
III-1 Remarque sur le processus itératif de calcul.....	7
III-2 Valeurs des coefficients spécifiques CAMt, Cac, Crt et Clg.....	8
III-3 Résultats du dimensionnement	9
III-4 Préconisations pour la mise en œuvre et dispositions constructives	13
III-5 Cas particulier des carrefours.....	13
III-5-1 Raccordement avec les chaussées traversantes	13
III-5-2 Goujonnage des dalles en carrefour.....	15
III-5-3 Prise en compte de l'engravure de scellement du rail de guidage.....	15
III-5-3-1 En situation de site propre (hors carrefour).....	15
III-5-3-2 En situation de carrefour.....	16
III-6 Synthèse pour l'établissement d'un avant projet sommaire.....	16
Annexe A1 : Détails des dimensionnements.....	18

La RATP a confié aux LCPC, LREP et LROP (désignés LPC - laboratoires des ponts et chaussées dans la suite), une étude générique (étude n°1) sur le dimensionnement des structures de chaussées pour Tramways sur pneus. Le présent document (rapport 1-2) constitue le rapport de la partie 2 de cette étude. Cette partie 2 concerne exclusivement le dimensionnement des structures rigides en dalles de béton goujonnées. Il fait suite au rapport 1-1 Formulation des hypothèses de dimensionnement du 17/03/2004, validé par la RATP le 05/05/2004.

I- TYPE DE STRUCTURES ETUDIEES

I-1 Commentaires sur les structures bitumineuses : rappel du rapport n°1-1

Si cette partie 2 de l'étude concerne le dimensionnement de structures rigides en béton, les structures bitumineuses sont également une solution envisagée par la RATP et les LPC. Leur dimensionnement fera l'objet du rapport 1-3 de l'étude (à venir, début 2005). Comme pour les chaussées rigides, les spécificités des voies pour tramway sur pneus entraînent pour les chaussées bitumineuses des adaptations au plan de la conception et au plan du dimensionnement. Ces adaptations, pour les deux types de chaussées, ont été exposées dans le rapport 1-1, qui propose une démarche de dimensionnement et précise l'ensemble des hypothèses nécessaires à la réalisation des calculs.

Dans le rapport 1-1, l'utilisation de chaussées bitumineuses comme voies de circulation de tramways guidés sur pneus faisait de plus l'objet de remarques particulières, sur lesquelles les LPC souhaitaient attirer l'attention de la RATP. Ces réserves concernent principalement :

- La longrine support du rail de guidage. Le bon fonctionnement du système impose le maintien dans le temps d'une très bonne cohésion de l'ensemble chaussée-longrine. Nous savons par expérience que l'interface entre une chaussée bitumineuse et un ouvrage en béton ayant des fonctions structurelles est exposée à des risques de dégradations plus ou moins bien maîtrisés, en particulier en régime de fonctionnement dynamique et vibratoire, ce qui est ici le cas. Sur ce type d'ouvrage (grand linéaire), l'hypothèse d'une étanchéité durable du joint chaussée – longrine est peu réaliste. Les infiltrations d'eau dans la structure semblent inévitables, ce qui est incompatible avec le maintien dans le temps du bon comportement de l'ouvrage. Par ailleurs, un pré-dimensionnement sommaire montre que la longrine trouvera appui sur le massif de sol et non sur les couches bitumineuses. Ceci vient accroître les difficultés, en exposant au risque de décompression du sol support lors des travaux de construction de la longrine, avec pour effet direct une majoration des efforts supportés par les couches bitumineuses encadrantes. Ces risques sont évidemment majorés dans les carrefours, zones dans lesquelles les charges du trafic routier transversal sont également appliquées directement à la longrine.
- Le comportement à l'orniérage de la couche de roulement bitumineuse. La canalisation totale des tramways, en raison du guidage par le rail central, nécessite a priori de la part des matériaux bitumineux, de très bonnes performances vis-à-vis de l'orniérage, d'autant plus que des contraintes altimétriques sévères sont à respecter tout au long de la vie de l'ouvrage. Il n'existe pas à ce jour de modèle prédictif du comportement à l'orniérage des matériaux bitumineux (alors que ces modèles existent pour prédire l'endommagement par fatigue des matériaux de chaussées). Dans l'établissement des projets routiers et

autoroutiers, la justification vis à vis de l'orniérage des matériaux bitumineux est réalisée principalement sur des bases empiriques, en référence souvent avec les résultats sur chaussées en service, obtenus dans un contexte similaire ou voisin de celui du projet étudié. Pour les tramways sur pneus, systèmes de transport en commun très récents, nous ne disposons bien entendu pas de ces retours d'expérience. Les quelques données disponibles aujourd'hui en France (Caen, Nancy) invitent cependant à une grande prudence. Vis à vis de l'orniérage par fluage des couches bitumineuses, des dispositions particulières seront certainement à envisager dans les stations et à proximité de celles-ci. Ceci sera également le cas dans les carrefours, à partir d'un certain niveau de trafic poids lourds traversant.

I-2 Choix de la structure rigide en dalles goujonnées

La stabilité de la longrine et le bon fonctionnement dans le temps du complexe chaussée – longrine soulève moins de difficultés dans le cas des chaussées rigides en béton. Par ailleurs, les risques d'orniérage par fluage de la couche de roulement sont complètement écartés avec ces chaussées rigides. Ceci avait conduit les LPC, dans le rapport 1-1 Formulations d'hypothèses, à donner l'avantage aux structures rigides en béton. Les structures bitumineuses restent toutefois une solution possible, à ce niveau de l'étude. Deux types de chaussée rigide avaient été envisagés : la structure en dalles goujonnées et la structure en béton armé continu (BAC). Chacune d'elle présente des avantages et des inconvénients, dont les principaux sont rappelés ci-dessous.

I-2-1 Avantages du BAC et inconvénients des dalles goujonnées

- Une tendance à la formation de petites cassures d'angles ou de fines fissures obliques est couramment observée en coin des dalles en béton. Sur les structures routières et autoroutières, ce défaut est en général mineur, parce que ces chaussées comportent une sur-largeur destinée à éloigner les charges roulantes du bord de dalle (distance pneus – bord de dalle de l'ordre de 1.20m à 1.50m). Dans le cas des plate-formes tramways ne comportant pas les mêmes dispositions de sur-largeur (distance pneus – bord de dalle égale à 0.51m), on ne peut pas exclure une aggravation avec le trafic de ces défauts initialement très localisés.
- De par leur conception, les joints transversaux entre dalles successives permettent les mouvements longitudinaux induits par les effets de dilatation – retrait du béton. Ces mouvements paraissent a priori peu compatibles avec la présence d'un rail de guidage axial, scellé aux dalles par coulage continu d'une résine.
- La structure en dalles nécessite des travaux d'entretien plus contraignants que ceux nécessités par la structure en BAC. Sont en particulier concernés les travaux périodiques de garnissage des joints entre dalles par un mastic de remplissage coulé à chaud ou à froid. Ce garnissage est obligatoire pour limiter les infiltrations d'eau dans la structure, et pour empêcher également la pénétration de corps étrangers risquant de provoquer des éclatements des bords de joint. Nous avons pu constater que ces exigences d'entretien sur tout le cycle de vie de l'ouvrage sont généralement difficiles à satisfaire sur les infrastructures de transports en commun. L'avantage de la solution BAC est de réduire considérablement le linéaire de joints à entretenir sur un itinéraire donné, en raison de l'absence de joints transversaux dans le revêtement.
- La structure en BAC présente de meilleures performances acoustiques que la structure en dalles de béton. En effet, sur cette structure discontinue, une augmentation du bruit de roulement, induite par le franchissement des joints par les véhicules, est généralement observée. La vitesse de circulation peu élevée du tramway sur pneus est cependant un élément favorable vis à vis de ce problème. Par ailleurs, vis à vis des

caractéristiques fonctionnelles de la surface de roulement (bruit mais aussi uni, adhérence, luminosité, etc.) le choix des matériaux de revêtement et leur traitement éventuel se feront en fonction des exigences particulières du projet, pour la solution rigide comme pour la solution bitumineuse.

I-2-2 Avantages des dalles goujonnées et inconvénients du BAC

- La technique des dalles goujonnées se prête bien à des applications dans le domaine de la voirie urbaine et des infrastructures pour transports en commun. Les réalisations urbaines utilisant cette technique sont aujourd’hui fréquentes, sans que le retour d’expérience ne conduise à signaler de problèmes ni de pathologie particulière. Un avantage notable de cette structure, par rapport à la technique du BAC, est de s’adapter simplement aux particularités géométriques d’un tracé donné, moyennant un calepinage de dalles approprié. Cette souplesse d’adaptation est appréciable dans le voirie pour tramway sur pneus, en raison des variations fréquentes de la coupe en travers sur le linéaire de la voie (cf. par exemple la succession des zones avec poteaux axiaux et des zones avec poteaux latéraux).
- En revanche la technique du béton armé continu s’accommode plus difficilement de ces variations de section transversale de la chaussée. Les réalisations en BAC dans le domaine urbain restent très rares aujourd’hui. Des difficultés de transposition à la voirie pour tramway ne sont pas exclues. Le bon fonctionnement mécanique de la chaussée en BAC nécessite normalement une continuité de réalisation sur plusieurs centaines de mètres. Ceci est le cas sur les chantiers routiers et autoroutiers. Bien que cette appréciation relève de l’étude d’un projet spécifique, il faut envisager d’ores et déjà que de telles longueurs seront difficiles à obtenir sur les structures urbaines pour tramway, en raison notamment de:
 - la fréquence des changements de section transversale,
 - la répétition des carrefours,
 - les traitements de situations particulières telles que les massifs de fondation des poteaux, les virages serrés, etc.

Des rendements de mise en œuvre plus faibles que ceux obtenus en rase campagne sont donc prévisibles, avec des conséquences probables sur les délais et les coûts de réalisation.

- Dans le cas de la structure en BAC, la réalisation des courbes à faible rayon (cf. changements de direction à 90° au droit de certains carrefours) soulève également des difficultés, peut compatibles avec la mise en œuvre à l’aide d’une slip-forme. D’une part, dans ces parties de la chaussée, les aciers devront être assemblés sur supports distanciers (leur introduction par des trompettes dans la machine ne sera pas possible). D’autre part, une mise en œuvre manuelle du béton sera probablement obligatoire. Il conviendra également, dans le cadre de l’étude détaillée, de définir le rayon minimal permettant à une slip-form de mouler la réservation centrale pour le rail de guidage.
- La présence d’aciers continus dans la structure en BAC expose au risque d’interférence entre les boucles différentielles de détection de la signalisation des carrefours et ces armatures continues. Les structures en dalles goujonnées, qui ne comportent pas d’aciers continus, devraient limiter ces risques d’interférence.
- Sur la structure en BAC, on peut également craindre le phénomène de corrosion des armatures par les courants vagabonds dus au retour de courant de traction par le rail de guidage.

Les éléments qui précèdent ont conduit à retenir la structure rigide en dalles goujonnées, pour la suite de cette étude générique centrée sur la solution béton. En dépit de difficultés d’adaptation prévisibles qui devront faire l’objet d’études détaillées dans le cadre d’un projet

finalisé, la solution BAC reste toutefois une solution possible, présentant par rapport aux dalles goujonnées divers avantages qui ont été listés plus haut.

II- HYPOTHESES ET DONNEES POUR LE DIMENSIONNEMENT

II-1 Démarche de calcul

Les dimensionnements des chaussées en dalles de béton goujonnées objet de cette partie de l'étude ont été réalisés selon la démarche du dimensionnement rationnel des chaussées routières et autoroutières LCPC-SETRA, comme cela a été proposé dans le rapport 1-1. Appliquée au dimensionnement des chaussées pour tramway guidé sur pneu, cette démarche nécessite diverses adaptations, qui seront rappelées plus bas (cf. §III-2).

II-2 Données pour le dimensionnement

Les jeux d'hypothèses pour lesquels les dimensionnements sont à réaliser sont récapitulés dans le tableau 1.

Trafic Tramway : <i>3 cas à étudier</i>	<ul style="list-style-type: none"> - 100 % du trafic de référence (soit 7 millions d'essieux - 1.6 million de rames sur la durée de service de 30 années) - 150% du trafic de référence - 200% du trafic de référence
Trafic routier transversal (carrefour) : <i>5 cas à étudier</i>	<ul style="list-style-type: none"> - nul (Tramway en site propre) - trafic routier de classe 1a (MJA=1000 PL/jour, CAM=1.3) - trafic routier de classe 1b (MJA=1000 PL/jour, CAM=0.8) - trafic routier de classe 2a (MJA=400 PL/jour, CAM=1.3) - trafic routier de classe 2b (MJA=400 PL/jour, CAM=0.8)
Plate-forme : <i>4 cas à étudier</i>	<ul style="list-style-type: none"> - portance 35 Mpa - portance 75 MPa - portance 120 Mpa - portance 200 Mpa
Risques de rupture à l'issue de la durée de service : <i>2 cas à étudier</i>	<ul style="list-style-type: none"> - 2% - 5%
Pourcentage de rames en situation de croisement : <i>1 hypothèse unique</i>	<ul style="list-style-type: none"> - 10% (les contraintes dans les couches de chaussées sont majorées en situation de croisement, par effet d'interaction entre les sollicitations créées par chaque rame)
Qualité des matériaux : <i>1 hypothèse unique</i>	<ul style="list-style-type: none"> - qualité Q2 correspondant à des performances mécaniques minorées de 10% (modules) ou 15% (fatigue)

Tableau 1: Données pour le dimensionnement des structures en dalles goujonnées

Les réserves ci-dessous s'appliquent en situation de portance minimale 35 Mpa (cf. rapport I-1 Formulation d'hypothèses) :

- en site propre : la plate-forme doit obligatoirement comporter une couche de forme, traitée ou non traitée ;

- en carrefour ouvert au trafic poids lourds : le niveau de portance 35 Mpa est insuffisant, une portance minimale de 50 Mpa étant requise.

Le nombre de dimensionnements à réaliser se monte ainsi à 96.

Les données initiales concernant le trafic routier transversal étaient les valeurs du trafic poids lourds moyen journalier (MJA = 1000 PL/j et 400 PL/j). Pour réaliser les dimensionnements des chaussées, ces données doivent être complétées par les coefficients d'agressivité moyenne du trafic (CAM). Deux types de trafic, caractérisés par deux valeurs différentes du coefficient CAM, ont donc été envisagés pour la suite :

- CAM = 1.3 : trafic PL routier ou autoroutier lourd sur chaussée rigide
- CAM = 0.8 : trafic urbain lourd sur chaussée rigide.

On observera que le dimensionnement ne distingue pas les sections courantes en alignement droit, des sections en courbe, ni des zones de station, ainsi que cela a été exposé dans le rapport 1-1. Le dimensionnement considère en effet que les effets des efforts additionnels de cisaillement liés aux courbes et au freinage se limitent à la couche superficielle de roulement. Ils sont sans influence sur le fonctionnement structurel de la chaussée (couche de base et couche de fondation), en raison de la diffusion des contraintes tangentielles dans l'épaisseur de la structure. Dans ces zones, une attention particulière devra donc porter sur le choix de la couche de roulement dans le cas des structures bitumineuses. Par contre le revêtement en béton ne nécessitera évidemment pas de dispositions particulières, vis à vis de cette question du choix de la couche de roulement.

III- DIMENSIONNEMENT

III-1 Remarque sur le processus itératif de calcul

L'application de la méthode rationnelle routière aux calculs des structures pour tramways sur pneus nécessite la détermination de paramètres spécifiques propres à ce matériel roulant (cf. rapport 1-1). Ces paramètres sont rappelés ci-dessous :

- CAMt coefficient d'agressivité moyenne des essieux du tramway, évaluée par rapport à l'essieu de référence du dimensionnement standard (essieu simple à roues jumelées de poids total 130 kN),
- Cac coefficient pour la prise en compte de la canalisation totale du trafic,
- Crt coefficient pour la prise en compte de la majoration des sollicitations dans les matériaux de chaussée en situation de croisement de rames,
- Clg pour la prise en compte de la sur-largeur réduite des dalles en béton (0.51 m), par rapport aux chaussées routières et autoroutières.

Le principe de calcul de ces 4 coefficients a été détaillé dans le rapport 1-1. Pour un type de chaussée donné (ici dalles de béton goujonnées sur couche fondation en béton maigre), les calculs montrent que la valeur des 4 coefficients dépend de :

- la portance (module) du sol support,
- l'épaisseur des différentes couches de matériaux, c'est à dire en fait du résultat du dimensionnement.

De ce fait, le dimensionnement se déroule en pratique suivant une démarche itérative visant à assurer la cohérence finale entre les épaisseurs prises en compte pour le calcul des coefficients CAMt, Cac, Crt et Clg, et les résultats du dimensionnement.

Les différentes étapes de cette démarche itérative ne seront pas présentées dans cette note. On ne présentera que les valeurs finales de CAMt, Cac, Crt et Clg, utilisées pour la dernière étape des dimensionnements (dernière itération). On vérifiera ci-dessous que ces coefficients ont bien été établis pour des épaisseurs de matériaux très proches de celles des dimensionnement proposés, dont les épaisseurs minimales et maximales (en fonction des données de trafic et des risques) sont les suivantes :

	Sol support 35 MPa	Sol support 75 MPa	Sol support 120 MPa	Sol support 200 MPa
Epaisseur de fondation BC2 (invariable)				
	21 cm	18 cm	15 cm	12 cm
Epaisseur des dalles BC5 variables selon trafic tramway et trafic routier et selon risque				
Dimensionnements	épaisseur maxi	24 cm	23 cm	23 cm
Proposés (cf. §III-3)	épaisseur mini	19 cm	18 cm	19 cm
Structures pour le calcul de CAMt, Cac, Crt et Clg : épaisseur BC5	22 cm	22 cm	22 cm	22 cm

Tableau 2: Justifications de structures adoptées pour la calcul des coefficients CAMt, Cac, Crt et Clg en itération finale de calcul

III-2 Valeurs des coefficients spécifiques CAMt, Cac, Crt et Clg

Les coefficients CAMt, Cac, Crt et Clg ont été établis selon la démarche détaillée dans le rapport 1-1. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 3.

	Sol support 35 MPa	Sol support 75 MPa	Sol support 120 MPa	Sol support 200 MPa
Structures pour le calcul de CAM, Cac, Crt et Clg	22cm BC5 21cm BC2	22cm BC5 18cm BC2	22cm BC5 15cm BC2	22cm BC5 12cm BC2
Coefficient d'agressivité moyenne CAMt de l'essieu Tramway	0.04	0.06	0.07	0.10
Coefficient de canalisation totale Cac	2.05	2.05	2.05	2.05
Coefficient de croisement Crt	10	3.64	2.56	1.84
Coefficient de sur-largeur réduite Clg	1.53	1.35	1.27	1.21
Coefficient d'agressivité globale Cag fixant l'équivalence entre l'essieu Tramway sur pneus et l'essieu standard de 130 kN : Cag = CAMtxCacxCrtxClg	1.19	0.56	0.48	0.45
Coefficient d'agressivité globale de la rame Tramway : estimation sur la base de 4.5 essieux par rame (moyenne type 1 – type2)	5.4	2.5	2.1	2.0

Tableau 3 : Valeurs des coefficients CAM, Cac, Crt et Clg, et du coefficient global d'équivalence Cag essieu Tramway sur pneus – essieu standard de 130 kN

Les calculs sont détaillés dans l'annexe A1. Ils reposent sur des modélisations réalisées avec le logiciel aux éléments finis César-Lcpc, et le logiciel de dimensionnement des chaussées Alizé-Lcpc. On retiendra des valeurs qui précèdent que :

- L'agressivité CAMt propre des essieux (et donc des rames) du tramway sur pneus est faible (0.04 à 0.10 selon la portance du support), en raison des faibles charges à l'essieu : 99% des essieux sont chargés à moins de 75 kN, à comparer à la charge de référence standard, 130 kN à l'essieu.
- La canalisation totale du trafic a pour effet de doubler l'agressivité propre du tramway (coefficients Cac = 2.05 pour les 4 portances examinées).
- La majoration des sollicitations dans la chaussée associée au croisement des rames, appliquée à 10% du trafic exerce sur l'agressivité du tramway un effet très variable selon la portance du support (comme attendu). Sa valeur décroît avec la portance, de Crt=10 (portance 35 Mpa) à Crt=1.84 (portance 200 Mpa). L'hypothèse de croisement appliquée à 10% du trafic exerce donc une influence sensible sur les dimensionnements en particulier pour les portances faibles et moyennes.
- En comparaison avec l'effet de croisement des rames, l'effet des sur-largeurs réduites par rapport à celles des chaussées routières et auto-routières est relativement modéré (majoration de l'agressivité propre dans un rapport variant entre 1.53 et 1.21).
- L'agressivité globale de la rame tramway, intégrant les effets ci-dessus, prend les valeurs 5.4 (portance 35 Mpa), 2.5 (portance 75 Mpa), 2.1 (portance 120 Mpa) et 2.0 (portance 200 Mpa). Ces valeurs sont à rapprocher de l'agressivité moyenne des poids lourds sur chaussées rigides (1.3 sur réseau routier structurant et 0.8 en milieu urbain).

Il est prévu pour assurer le raccordement de la voie Tramway avec les chaussées traversantes, des dalles de transition, goujonnées avec les dalles de la voie Tramway (cf ; §III-5). De ce fait le franchissement du bord longitudinal de la voie Tramway par le trafic routier n'induit pas de sollicitations additionnelles qui ne seraient pas prises en compte par le coefficient de bord habituel des chaussées en dalles goujonnées (1/1.47). En revanche, il conviendra de prendre en compte cette majoration des contraintes pour le dimensionnement des dalles de transition.

III-3 Résultats du dimensionnement

Les calculs détaillés de dimensionnement sont reportés en annexe A1. Pour l'ensemble des structures obtenues, le critère dimensionnant est la contrainte de traction par flexion à la base du béton de dalle BC5. Le critère concernant la contrainte de traction à la base du béton de fondation BC2 n'est en effet jamais atteint. C'est également le cas pour le critère s'appliquant à la déformation verticale au sommet du sol, qui n'est jamais atteint, ce qui découle directement de la rigidité du revêtement en béton.

Le tableau 4 récapitule les trafics cumulés équivalents utilisés pour les dimensionnements. Ces trafics résultent des hypothèses de trafic tramway et trafic routier, et des coefficients globaux d'agressivité Cag détaillés plus haut. Les classes de trafic du Catalogue des chaussées neuves LCPC-SETRA de 1998, correspondant aux trafics cumulés indiqués, sont également mentionnées (classes TC pour les chaussées en béton, voies VRS du réseau structurant).

Le tableau 5 récapitule les dimensionnements pour l'hypothèse : risque = 2%. Le tableau 6 récapitule les dimensionnements pour l'hypothèse : risque = 5%

Trafic Tramway	trafic PL (carrefour)	Sol 35MPa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
Trafic de référence	0	8.4 (TC5)	3.9 (TC3)	3.4 (TC3)	3.2 (TC3)
	C1a	28.8 (TC6)	24.3 (TC6)	23.8 (TC6)	23.6 (TC6)
	C1b	20.9 (TC6)	16.5 (TC5)	15.9 (TC5)	15.7 (TC5)
	C2a	16.5 (TC5)	12.1 (TC5)	11.5 (TC5)	11.3 (TC5)
	C2b	13.4 (TC5)	8.9 (TC5)	8.4 (TC5)	8.2 (TC5)
150% trafic de référence	0	12.6 (TC5)	5.9 (TC4)	5.0 (TC4)	4.8 (TC4)
	C1a	33.1 (TC6)	26.4 (TC6)	25.6 (TC6)	25.3 (TC6)
	C1b	25.2 (TC6)	18.4 (TC6)	17.6 (TC5)	17.3 (TC5)
	C2a	20.8 (TC6)	14.0 (TC5)	13.2 (TC5)	12.9 (TC5)
	C2b	17.6 (TC5)	10.9 (TC5)	10.1 (TC5)	9.8 (TC5)
200% trafic de référence	0	16.7 (TC5)	7.8 (TC4)	6.7 (TC4)	6.3 (TC4)
	C1a	37.3 (TC6)	28.3 (TC6)	27.2 (TC6)	26.9 (TC6)
	C1b	29.3 (TC6)	20.4 (TC6)	19.3 (TC6)	19.0 (TC6)
	C2a	24.9 (TC6)	16.0 (TC5)	14.9 (TC5)	14.5 (TC5)
	C2b	21.9 (TC6)	12.8 (TC5)	11.7 (TC5)	11.4 (TC5)
Trafics PL : C1a : MJA=1 000PL/jour CAM=1.3 C1b : MJA=1 000PL/jour CAM=0.8 C2a : MJA= 400PL/jour CAM=1.3 C2b : MJA= 400PL/jour CAM=0.8					

Tableau 4 : Trafics cumulés (en millions d'essieux standard de 130 kN) pour le dimensionnement, et classes de trafic correspondant au sens du Catalogue des chaussées neuves LCPC-SETRA de 1998, chaussées béton, voies de réseau structurant VRS

Les épaisseurs de béton BC2 en couche de fondation ont été fixées à 21 cm (portance 35Mpa), 18 cm (portance 75 Mpa), 15 cm (portance 120 Mpa) et 12 cm (portance 200 Mpa). Ces épaisseurs sont celles recommandées par le Catalogue de chaussées neuves 1998 LCPC-SETRA, et nous recommandons de ne pas les modifier.

Nota important :

Les épaisseurs de béton indiquées dans les tableaux 5 et 6 en situation de carrefour prennent en compte l'épaississement des dalles, nécessaire pour compenser la réduction d'inertie résultant des gravures de rails. La détermination de l'épaisseur de béton supplémentaire est explicitée au §III.5.3. Les valeurs indiquées dans les deux tableaux sont celles obtenues dans l'hypothèse où il n'est pas mis en place un ferraillage spécifique de renfort dans cette région des dalles.

Dans le cas contraire (cage d'armature placée sous les gravures) l'épaisseur des dalles pourra être ramenée à 23 cm.

Ainsi que cela est toujours l'usage en pratique, les épaisseurs sont présentées dans les tableaux 5 et 6 en valeurs arrondies au cm supérieur. Ceci explique l'aspect discontinu des variations d'épaisseur des dalles en fonction du trafic de calcul.

On observe que l'hypothèse sur le paramètre risque (2% ou 5%) a pour effet des variations d'épaisseur des dalles de 1 à 2 cm.

		Sol 35Mpa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
		Epaisseur de la couche de fondation en béton BC2 :			
Trafic Tramway	trafic PL (carrefour)	21 cm	18 cm	15 cm	12 cm
Epaisseur des dalles en béton BC5 goujonné :					
Trafic de référence	0	21 cm	20 cm	20 cm	20 cm
	C1a	*	26 cm **	26 cm **	26 cm **
	C1b	*	26 cm **	26 cm **	25 cm **
	C2a	*	26 cm **	26 cm **	25 cm **
	C2b	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **
150% trafic de référence	0	22 cm	20 cm	21 cm	20 cm
	C1a	*	26 cm **	26 cm **	26 cm **
	C1b	*	26 cm **	26 cm **	26 cm **
	C2a	*	26 cm **	26 cm **	26 cm **
	C2b	*	25 cm **	26 cm **	25 cm **
200% trafic de référence	0	22 cm	21 cm	21 cm	21 cm
	C1a	*	26 cm **	26 cm **	26 cm **
	C1b	*	26 cm **	26 cm **	26 cm **
	C2a	*	26 cm **	26 cm **	26 cm **
	C2b	*	26 cm **	26 cm **	25 cm **

Trafics PL : C1a : MJA=1 000PL/jour CAM=1.3 C1b : MJA=1 000PL/jour CAM=0.8
C2a : MJA= 400PL/jour CAM=1.3 C2b : MJA= 400PL/jour CAM=0.8

(*) en carrefour ouvert au trafic poids lourds, une portance de valeur minimale 35 Mpa est requise pour la plate-forme

(**) la valeur indiquée prend en compte la sur-épaisseur de béton nécessitée par les gravures de rail. La mise en place d'une cage d'armatures sous les gravures ramène l'épaisseur de la dalle à 23 cm.

Tableau 5 : Dimensionnement des structures en dalles goujonnées pour le risque 2%.

		Sol 35Mpa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
		Epaisseur de la couche de fondation en béton BC2 :			
Trafic Tramway	trafic PL (carrefour)	21 cm	18 cm	15 cm	12 cm
Epaisseur des dalles en béton BC5 goujonné :					
Trafic de référence	0	19 cm	18 cm	19 cm	19 cm
	C1a	*	25 cm **	26 cm **	25 cm **
	C1b	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **
	C2a	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **
	C2b	*	24 cm **	25 cm **	25 cm **
150% trafic de référence	0	20 cm	19 cm	19 cm	19 cm
	C1a	*	25 cm **	26 cm **	25 cm **
	C1b	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **
	C2a	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **
	C2b	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **
200% trafic de référence	0	20 cm	19 cm	20 cm	20 cm
	C1a	*	25 cm **	26 cm **	25 cm **
	C1b	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **
	C2a	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **
	C2b	*	25 cm **	25 cm **	25 cm **

Légendes et commentaires : voir tableau 5

Tableau 6: Dimensionnement des structures en dalles goujonnées pour le risque 5%

III-4 Préconisations pour la mise en œuvre et dispositions constructives

On trouvera dans le Cahier des charges techniques générales (CCTG) - fascicule 28, Chaussées en béton, des recommandations indispensables pour la mise au point des projets. On adoptera également, en général, les dispositions préconisées par le Guide technique Chaussées en béton LCPC-SETRA de 1997. Ce guide technique, élaboré par les services techniques de l'Administration en collaboration avec les entreprises de construction routière et de l'industrie cimentière, apporte des éléments d'information concrète essentiels sur la conception et la construction des chaussées en béton. Ceci concerne notamment :

- Les dimensions longitudinales des dalles entre joints transversaux : elles sont limitées à environ 25 fois l'épaisseur des dalles, et donc voisines de 5 mètres ;
- Les joints transversaux : ils seront réalisés obliquement avec un angle d'environ 15° avec la perpendiculaire à l'axe de la voie ;
- La nécessité de prévoir également un joint longitudinal de retrait comportant des fers de liaison (HA 12 mm tous les mètres) ;
- La réalisation d'un système de drainage continu des interfaces de la structure en béton ;
- Les dispositions concernant les goujons ;
- Les différentes possibilités de traitement pour la surface de la couche de roulement, en fonction notamment des exigences d'uni, d'adhérence, de bruit, de luminosité et de couleur, etc ;
- Les dispositions à adopter en situation de franchissement d'ouvrage d'art et de croisement avec des chaussées existantes ;
- Des informations sur les techniques d'entretien.

III-5 Cas particulier des carrefours

III-5-1 Raccordement avec les chaussées traversantes

En l'absence de dispositions particulières, la traversée par le trafic routier transversal, des bords extérieurs longitudinaux des dalles en béton de la voie Tramway, crée à la base des dalles des contraintes de traction plus élevées qu'en section courante. Les dalles de béton de la voie Tramway ne sont pas dimensionnées vis à vis de ces majorations de contraintes sous les bords longitudinaux. Il en résulterait des sur-épaisseurs des dalles dans les carrefours, ce que l'on cherche à éviter. Ceci ne réglerait pas, de toute façon, le problème de la transition entre la chaussée Tramway et la voie traversante.

Des dalles de transition assurant le raccordement entre la chaussée Tramway et la chaussée traversante sont donc envisagées (cf. figure 1). Ces dalles de transition sont goujonnées avec les dalles de la voie Tramway sur toute la largeur du carrefour. Ainsi, la traversée des bords longitudinaux par le trafic routier n'engendre pas de majoration des contraintes dans les dalles de la voie Tramway.

En revanche, ces contraintes de bord libre seront subies par les dalles de transition. Ces parties d'ouvrage très particulières ne sont pas traitées par le dimensionnement routier courant. Elles devront faire l'objet d'un dimensionnement spécifique, en fonction de la géométrie du carrefour (largeur, biais, ...), de la structure de la chaussée traversante, de la portance du support, du trafic, etc. Ceci n'est pas abordé dans la présente note. Il pourra être envisagé d'armer ces dalles, en particulier pour assurer la reprise des sollicitations du trafic sur leur bord transversal en contact avec la chaussée bitumineuse existante.

Les dalles de transition contribueront à assurer le raccordement en nivellation, entre la voirie urbaine existante et la nouvelle voie Tramway. La surface de roulement des tramways se situe en effet environ à 14 cm au dessus de la voirie urbaine (figure 2).

Dans la direction longitudinale, la dimension des dalles de transition sera comprise entre environ 2.5 et 3 mètres. La dalle de transition pourra comporter par ailleurs un ou plusieurs joints longitudinaux, en fonction de la largeur du carrefour. Ils seront implantés de façon à :

- Limiter la distance entre joints longitudinaux à une valeur maximale comprise entre 4 et 5 mètres ;
- Réduire les risques de singularité géométrique et de concentration de contraintes dans la zone de raccordement avec les dalles de la voie Tramway, en recherchant une continuité avec les joints transversaux des dalles de la voie Tramway.

Les dispositions signalées au §III.4 pour les joints longitudinaux de la voie Tramway, s'appliqueront de la même façon à ceux des dalles de transition.

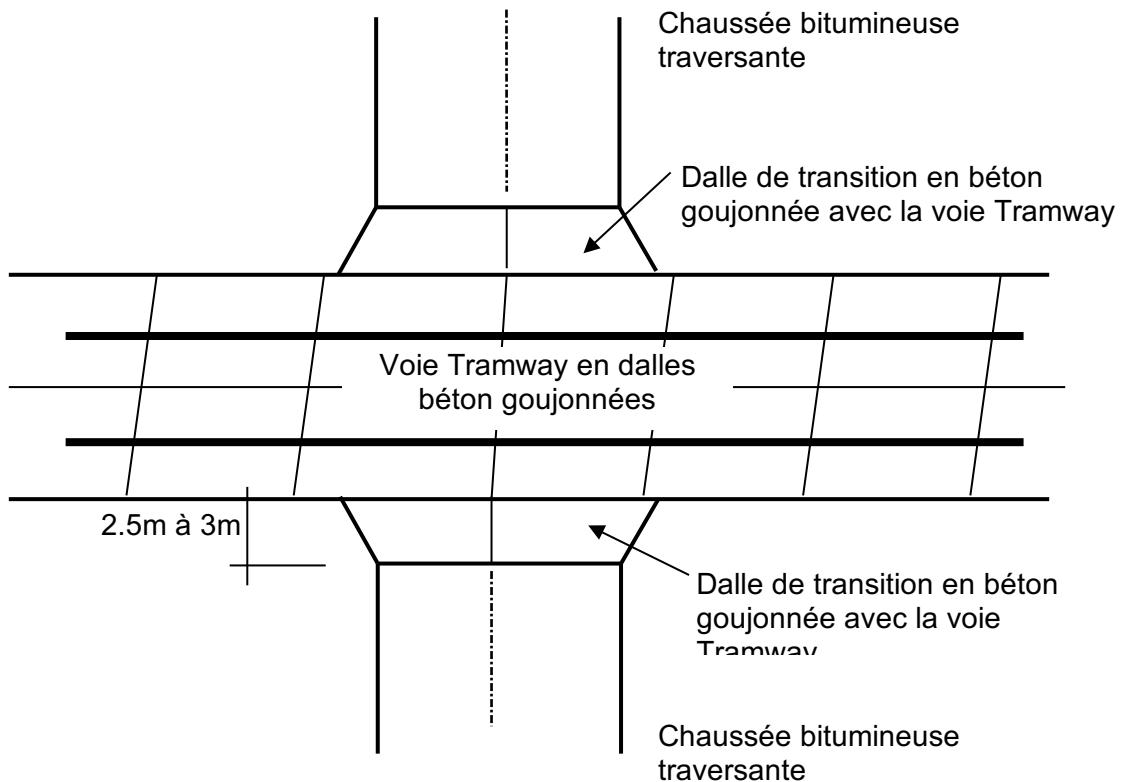


Figure 1 : Raccordement de la voie Tramway avec les chaussées traversantes – vue de dessus, schéma de principe

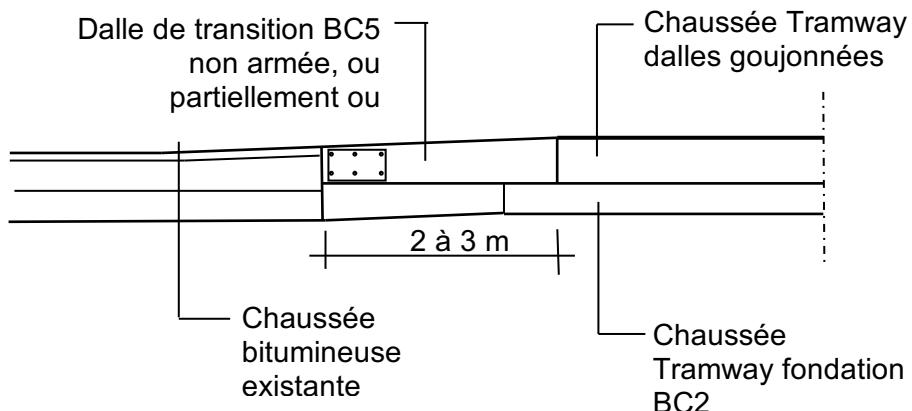


Figure 2 : Raccordement de la voie Tramway avec les chaussées traversantes – coupe, schéma de principe

III-5-2 Goujonnage des dalles en carrefour

Les joints des dalles en béton goujonnées de la voie Tramway supportent à la fois un trafic longitudinal et transversal. Les dispositions habituellement retenues pour les joints transversaux et longitudinaux de ces dalles particulières ne sont donc systématiquement applicables. Leur mode de fonctionnement prévisible nous conduisent à préconiser les dispositions suivantes :

- Joints transversaux goujonnés de la voie Tramway : pas de modification.
- Joint longitudinal de la voie Tramway : remplacement sur la longueur du carrefour des aciers de liaison HA 12 mm par des aciers lisses de diamètre 20 mm, exerçant le rôle de goujons vis à vis de la circulation par le trafic routier traversant .

III-5-3 Prise en compte de l'engravure de scellement du rail de guidage

Une gravure de largeur 20 cm, profondeur 7 cm est prévue pour permettre la pose et le scellement des rails de guidage. De cette réduction de section des dalles en béton résultent deux dispositions au niveau de leur dimensionnement:

III-5-3-1 En situation de site propre (hors carrefour)

Les modélisations EF-3D montrent que l'engravure est sans effet appréciable sur les sollicitations créées par le trafic Tramway dans la structure en béton. Ce ne sera pas le cas pour les sollicitations créées par le trafic routier dans les carrefours. Toutefois, l'épaisseur de la dalle sous l'engravure doit permettre la mise en place d'un ferraillage assurant le frettage du béton, nécessaire pour réaliser un scellement efficace et durable du rail. Ce ferraillage est de plus destiné à empêcher la fissuration longitudinale du béton sous l'engravure, risque lié à l'affaiblissement de la section utile de béton dans cette partie de la dalle.

La mise en place de ce ferraillage ne nécessite pas de sur-épaisseur des dalles en béton, dans les zones hors carrefour, sous réserve que la condition suivante soit strictement respectée pendant toute la durée de service de la chaussée :

absence de toute circulation lourde en partie centrale des voies Tramway, en particulier dans la région des deux gravures centrales (donc, les seuls véhicules lourds circulant sur la chaussée hors carrefour seront les rames de tramway).

III-5-3-2 En situation de carrefour

Les modélisations EF-3D montrent que, au passage du trafic routier, les contraintes de traction à la base du béton sous les engravures dépassent très largement leurs valeurs admissibles vis à vis de la fatigue, si aucune disposition ne vient compenser le déficit de rigidité de la structure liée aux engravures.

Deux types de dispositions sont envisageables, afin de permettre la reprise des majorations d'effort liées à l'engravure :

- **Disposition 1 :**

Mise en place d'un ferraillage au droit de l'engravure, sur une largeur d'environ 60 cm, afin de compenser l'affaiblissement de rigidité de la dalle créée par l'engravure. Des considérations concernant l'enrobage minimal des aciers supérieurs (4 cm, cf. sel de déverglaçage éventuel) et inférieurs (2 cm) de ce ferraillage, ainsi que la distance minimale entre ces deux nappes d'acier, conduisent à exiger l'épaisseur minimale de béton suivante sous l'engravure : 16 cm. Ceci conduit à une épaisseur totale de la dalle d'au moins 16 cm + 7 cm = 23 cm, constante sur toute la dalle.

- **Disposition 2 :**

pas de ferraillage renfort sous les engravures, autre que le ferraillage secondaire de liaison (cf. III-5-2-1) Les modélisations réalisées avec le code César EF-3D, en reproduisant la présence d'engravure dans les dalles, conduisent aux résultats suivants :

Epaisseur des dalles en carrefour, en l'absence d'engravure	19 ou 20 cm	21 ou 22 cm	23 ou 24 cm
Epaisseur des dalles en carrefour, sans armature primaires de flexion	Epaisseur majorée de 5 cm	Epaisseur majorée de 4 cm	Epaisseur majorée de 3 cm

Les résultats de dimensionnement présentés plus haut (cf. tableaux 5 et 6) prennent en compte ces augmentations d'épaisseur des dalles nécessitées par la présence d'engravures dans la structure de chaussée.

III-6 Synthèse pour l'établissement d'un avant projet sommaire

Avec les données de projet suivantes :

- durée de service : 30 années,
- portance du sol support : 75 MPa,
- trafic Tramway : 150% du trafic de référence (soit $1.6 \times 150\% = 2.35$ millions de rames sur 30 années)
- risque d'endommagement nécessitant une reconstruction à l'issue de la durée de service : 2%,

le pré-dimensionnement de la voie Tramway dans le cas d'une solution de type dalles en béton goujonnées est le suivant :

- en site propre (hors carrefour) : dalles en béton BC5 d'épaisseur 20 cm sur fondation en béton maigre BC2 de 18 cm d'épaisseur.
- en carrefour de classe C2a (400 PL/jours, agressivité CAM = 1.3) : dalles en béton BC5 d'épaisseur 23 cm, sur fondation en béton maigre BC2 de 18 cm d'épaisseur. Les dalles comporteront deux cages d'armatures filantes sur toute leur longueur, largeur environ 60 cm, disposée sous les engravures. Ces cages d'armatures ont

pour rôle de compenser de déficit de rigidité des dalles au droit des engravures. Une variante possible pour s'affranchir de la mise en place de ces cages d'armatures de flexion (tout en maintenant les armatures transversales de liaison sous les engravures) sera de réaliser une dalle d'épaisseur constante 26 cm.

Par rapport à ces dimensionnements, les variations d'hypothèses portant sur le trafic tramway (100% à 200% du trafic de référence), ou sur le risque pour le dimensionnement (2% ou 5%), enfin sur le trafic routier traversant (C1 (1000 PL/jour) ou C2 (400 PL/jour)), se traduisent par des variations d'épaisseur des dalles de l'ordre du cm. Le changement de l'importance du sol support (de 35 Mpa à 200 Mpa) se traduit par une variation d'épaisseur des dalles au plus égale au cm, moyennant les ajustements suivants portant sur l'épaisseur du béton de fondation BC2 :

- sol support 35 Mpa : épaisseur du béton de fondation 21 cm,
 - sol support 75 Mpa : épaisseur du béton de fondation 18 cm,
 - sol support 120 Mpa : épaisseur du béton de fondation 15 cm,
 - sol support 200 Mpa : épaisseur du béton de fondation 12 cm.
-

ANNEXE A1 : DETAILS DES DIMENSIONNEMENTS

Etude RATP - Tramways sur Pneus

Partie Dimensionnement de la solution Dalles goujonnées

1- Calcul de l'agressivité propre de la rame moyenne

			contraintes Structure 22+21 sur 35Mpa	contraintes Structure 22+18 sur 75Mpa	contraintes Structure 22+15 sur 120Mpa	contraintes Structure 22+12 sur 200Mpa
Alizé ESJ: SigmaT=			1.181	1.05	0.97	0.883
Alizé RS 3.5t Q=6bars SigmaT=			0.79	0.719	0.675	0.627
Poids essieu RS de référence=			7	7	7	7
kdyn =			1.2	1.2	1.2	1.2
Pessieu	nbre	%	Sigma*kdyn	Sigma*kdyn	Sigma*kdyn	Sigma*kdyn
5.50	750 000	10.7%	0.745	0.678	0.636	0.591
6.00	610 000	8.7%	0.813		0.694	0.645
6.50	1 080 000	15.4%	0.880	0.801	0.752	0.699
7.00	2 880 000	41.0%	0.948	0.863	0.810	0.752
7.50	1 610 000	22.9%	1.016	0.924	0.868	0.806
8.00	100 000	1.4%	1.083	0.986	0.926	0.860
total=	7 030 000	100.0%				
	CAM essieux =		0.04	0.05	0.07	0.10

2- Calcul du coefficient de canalisation Cac

Excentrement	Pourcentage de trafic	contraintes Structure 22+21 sur 35Mpa	contraintes Structure 22+18 sur 75Mpa	contraintes Structure 22+15 sur 120Mpa	contraintes Structure 22+12 sur 200Mpa
-0.75	2.0%	0.676	0.556	0.485	0.411

-0.50	6.0%	1.016	0.889	0.812	0.729
-0.25	18.0%	1.187	1.057	0.977	0.89
0.00	26.0%	1.172	1.043	0.964	0.878
0.25	25.0%	0.819	0.696	0.621	0.542
0.50	15.0%	0.571	0.457	0.389	0.32
0.75	6.0%	0.425	0.32	0.261	0.203
1.00	3.0%	0.324	0.23	0.179	0.131
Contrainte équivalente SigmaTeq=		1.121	0.997	0.922	0.839
Cac=		2.05	2.05	2.05	2.05

3- Calcul du coefficient de croisement Crt

Calcul Alizé pour le chargement 1 ou 2 Roues simples 3.5 t Q=6bars	contraintes Structure 22+21 sur 35Mpa	contraintes Structure 22+18 sur 75Mpa	contraintes Structure 22+15 sur 120Mpa	contraintes Structure 22+12 sur 200Mpa
Sigma Alizé RS isolée	0.790	0.796	0.818	0.818
Sigma Alizé en croisement avec RS isolée à 93 cm	1.014	0.979	0.975	0.941
Coefficient d'agressivité Crtt pour 10% de croisement	10.00	3.64	2.56	1.84

4- Calcul du coefficient de surlargeur réduite Clg

Calcul César dalle 7mx6m charge à mi-longueur RS 3.5t Q=6bars	contraintes Structure 22+21 sur 35Mpa	contraintes Structure 22+18 sur 75Mpa	contraintes Structure 22+15 sur 120Mpa	contraintes Structure 22+12 sur 200Mpa
Distance axe/bord longi = 1.1m Sigmat=	0.417	0.365	0.342	0.417
Distance axe/bord longi = 0.515m Sigmat=	0.420	0.370	0.346	0.422
Coefficient de surlargeur réduite Clg =	1.53	1.35	1.27	1.21

5- Synthèse : Agressivité moyenne de l'essieu Tram

CAM essieu global =	1.19	0.55	0.48	0.45
---------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Agressivité moyenne rame = **5.36** **2.49** **2.14** **2.03**

6- Trafics équivalents NE pour les dimensionnements

trafic cumulé Tramway de référence (100%) en essieux = 7 030 000 soit en nbre de rames : 1 562 222

trafic cumulé PL classe 1 (1000PL/j) 30 ans 3% = 15 713 000

trafic cumulé PL classe 2 400PL/j) 30 ans 3% = 6 285 000

Agressivité CAM du trafic PL - hypothèse a = 1.3

Agressivité CAM du trafic PL - hypothèse b = 0.8

%Trafic Tram	trafic PL	Sol 35MPa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
100%	0	8 373 379	3 886 655	3 350 147	3 172 762
100%	classe 1a	28 800 279	24 313 555	23 777 047	23 599 662
100%	classe 1b	20 943 779	16 457 055	15 920 547	15 743 162
100%	classe 2a	16 543 879	12 057 155	11 520 647	11 343 262
100%	classe 2b	13 401 379	8 914 655	8 378 147	8 200 762
150%	0	12 560 068	5 829 983	5 025 220	4 759 142
150%	classe 1a	32 986 968	26 256 883	25 452 120	25 186 042
150%	classe 1b	25 130 468	18 400 383	17 595 620	17 329 542
150%	classe 2a	20 730 568	14 000 483	13 195 720	12 929 642
150%	classe 2b	17 588 068	10 857 983	10 053 220	9 787 142
200%	0	16 746 757	7 773 310	6 700 293	6 345 523
200%	classe 1a	37 173 657	28 200 210	27 127 193	26 772 423
200%	classe 1b	29 317 157	20 343 710	19 270 693	18 915 923
200%	classe 2a	24 917 257	15 943 810	14 870 793	14 516 023
200%	classe 2b	21 774 757	12 801 310	11 728 293	11 373 523

7- Valeurs admissibles BC5 (Mpa)

1/Kdisc	Kcalage	1/Ks	Sigma6	-1/b	Sh	Delta
1.47	1.5	1	1.9	16	0.01	1.0500

7-1 Risque = 2%	%Trafic Tram	trafic PL	Sol 35MPa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
	100%	0	1.245	1.306	1.318	1.323

U=	100%	classe 1a	1.152	1.165	1.166	1.167
-2.0537	100%	classe 1b	1.175	1.193	1.196	1.197
Kr=	100%	classe 2a	1.193	1.217	1.220	1.221
0.7332	100%	classe 2b	1.209	1.240	1.245	1.246
	150%	0	1.214	1.273	1.285	1.289
	150%	classe 1a	1.143	1.159	1.161	1.162
	150%	classe 1b	1.162	1.185	1.188	1.189
	150%	classe 2a	1.176	1.205	1.210	1.211
	150%	classe 2b	1.188	1.225	1.231	1.233
	200%	0	1.192	1.251	1.262	1.266
	200%	classe 1a	1.134	1.154	1.157	1.158
	200%	classe 1b	1.151	1.178	1.182	1.183
	200%	classe 2a	1.163	1.196	1.201	1.203
	200%	classe 2b	1.173	1.212	1.219	1.221
7-2 Risque =	%Trafic Tram	trafic PL	Sol 35MPa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
5%	100%	0	1.324	1.389	1.402	1.407
U=	100%	classe 1a	1.226	1.239	1.240	1.241
-1.6449	100%	classe 1b	1.250	1.269	1.272	1.273
Kr=	100%	classe 2a	1.269	1.294	1.298	1.299
0.7799	100%	classe 2b	1.286	1.319	1.324	1.326
	150%	0	1.291	1.354	1.367	1.372
	150%	classe 1a	1.215	1.233	1.235	1.236
	150%	classe 1b	1.236	1.260	1.264	1.265
	150%	classe 2a	1.251	1.282	1.287	1.289
	150%	classe 2b	1.264	1.303	1.309	1.311
	200%	0	1.268	1.330	1.343	1.347
	200%	classe 1a	1.206	1.227	1.230	1.231
	200%	classe 1b	1.224	1.253	1.257	1.258
	200%	classe 2a	1.237	1.272	1.277	1.279
	200%	classe 2b	1.247	1.289	1.296	1.299

Delta

8- Valeurs admissibles BC2

1/Kdisc	Kcalage	Sigma6	-1/b	Sh	1.3454
1	1.5	1.37	15	0.03	SN 1
		%Trafic Tram	trafic PL	Sol 35MPa	Sol 120MPa
				1/Ks=	1/Ks=
				1.2	1
Risque =	100%	0	1.486	1.707	1.896
50%	100%	classe 1a	1.369	1.510	1.664
U=	100%	classe 1b	1.398	1.550	1.709
0.0000	100%	classe 2a	1.420	1.582	1.746
Kr=	100%	classe 2b	1.440	1.615	1.783
1.0000	150%	0	1.447	1.661	1.845
	150%	classe 1a	1.356	1.502	1.656
	150%	classe 1b	1.381	1.538	1.697
	150%	classe 2a	1.399	1.567	1.730
	150%	classe 2b	1.415	1.594	1.762
	200%	0	1.419	1.629	1.810
	200%	classe 1a	1.346	1.495	1.649
	200%	classe 1b	1.367	1.528	1.687
	200%	classe 2a	1.382	1.553	1.717
	200%	classe 2b	1.395	1.576	1.744
					1.748

9- Calcul Alizé pour ESJ standard

9-1 Contrainte base BC5

HBC5 (cm)	Sol 35MPa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
	BC2 21 cm	BC2 18 cm	BC2 15 cm	BC2 12 cm
15	1.424	1.503	1.624	1.688
16	1.401	1.462	1.560	1.600
17	1.371	1.415	1.493	1.513
18	1.337	1.366	1.425	1.430
19	1.298	1.314	1.362	1.356
20	1.257	1.266	1.302	1.286

21	1.218	1.219	1.243	1.221
22	1.181	1.172	1.187	1.158
23	1.142	1.125	1.132	1.1
24	1.102	1.08	1.08	1.045
25	1.063	1.035	1.03	0.993
	18.3%	22.3%	26.4%	29.5%

9-2 Contrainte base BC2

HBC5 (cm)	Sol 35MPa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
	BC2 21 cm	BC2 18 cm	BC2 15 cm	BC2 12 cm
15	1.157	1.090	1.023	0.870
16	1.087	1.011	0.935	0.783
17	1.019	0.936	0.854	0.707
18	0.954	0.866	0.781	0.639
19	0.891	0.801	0.714	0.578
20	0.832	0.740	0.653	0.525
21	0.776	0.684	0.599	0.478
22	0.723	0.633	0.550	0.436
23	0.674	0.586	0.505	0.398
24	0.629	0.543	0.465	0.365
25	0.586	0.504	0.429	0.335

10- Dimensionnements proposés

10-1 Risque = 2%

%Trafic	trafic	Epaisseur des dalles BC5 (cm)			
		Sol 35MPa	Sol 75MPa	Sol 120MPa	Sol 200MPa
Tram	PL	BC2 21 cm	BC2 18 cm	BC2 15cm	BC2 12 cm
100%	0	21	20	20	20
100%	classe 1a	23	23	23	22
100%	classe 1b	23	22	22	22
100%	classe 2a	22	22	22	21
100%	classe 2b	22	21	21	21
150%	0	22	20	21	20
150%	classe 1a	23	23	23	22
150%	classe 1b	23	22	22	22

150%	classe 2a	23	22	22	22
150%	classe 2b	22	21	22	21
200%	0	22	21	21	21
200%	classe 1a	24	23	23	22
200%	classe 1b	23	22	23	22
200%	classe 2a	23	22	22	22
200%	classe 2b	23	22	22	21

10-2 Risque = 5%

%Trafic Tram	trafic PL	Sol 35MPa BC2 21 cm	Epaisseur des dalles BC5 (cm)		
			Sol 75MPa BC2 18 cm	Sol 120MPa BC2 15cm	Sol 200MPa BC2 12 cm
100%	0	19	18	19	19
100%	classe 1a	21	21	22	21
100%	classe 1b	21	20	21	21
100%	classe 2a	20	20	21	20
100%	classe 2b	20	19	20	20
150%	0	20	19	19	19
150%	classe 1a	22	21	22	20
150%	classe 1b	21	21	21	21
150%	classe 2a	21	20	21	20
150%	classe 2b	20	20	20	20
200%	0	20	19	20	20
200%	classe 1a	22	21	22	21
200%	classe 1b	21	21	21	21
200%	classe 2a	21	20	21	21
200%	classe 2b	21	20	21	20