

Directives techniques pour TRAM		
Chapitre :	6. INFRASTRUCTURE	
Section :		
Article :		Version : mai 2016

Table des matières du chapitre

	sections / pages
6.1 Généralités	6.1 / 1 à 3
6.2 Pose traditionnelle	
6.2.1 Traverses	6.2 / 1 à 3
6.2.2 Rails	6.2 / 4 à 6
6.2.3 Comparatif des poses de voies courantes	6.2 / 7
6.2.4 Cordon anti-usure	6.2 / 8 à 9
6.2.5 Coupes types	6.2 / 10 à 14
6.2.6 Etapes de construction	6.2 / 15
6.2.7 Evacuation des eaux de surface	6.2 / 16 à 19
6.2.8 Exemples d'exécution	6.2 / 20
6.3 Mesures antivibratoires	
6.3.1 Généralités	6.3 / 1 à 2
6.3.2 Pronostics des vibrations	6.3 / 3 à 11
6.3.3 Choix du type de mesures de protection	6.3 / 12
6.3.4 Exemple avec attaches antivibratoires des rails	6.3 / 13
6.3.5 Exemple d'une dalle flottante légère sur appui surfacique (tapis résilient)	6.3 / 14
6.3.6 Exemple de franchissement d'une chambre située directement sous voie	6.3 / 15
6.3.7 Exemple d'une dalle flottante légère sur appui surfacique	6.3 / 16

Directives techniques pour TRAM		
Chapitre :	6. INFRASTRUCTURE	
Section :		
Article :		Version : mai 2016

sections / pages

6.3.8 Exemple d'une dalle flottante lourde sur appui surfacique (tapis résilient)	6.3 / 17
6.3.9 Exemple d'une dalle flottante lourde sur appuis linéaires	6.3 / 18
6.3.10 Exemple d'une dalle flottante d'inertie en béton sur plots résilients	6.3 / 19
6.3.11 Pose anti-vibratile niveau 1 : amortissement vibratoire – 10 dBv	6.3 / 20

Remarque : Les épaisseurs données dans les profils types le sont à titre indicatif. Elles doivent être déterminées selon les normes VSS et les indications d'un géotechnicien.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.1 / 1
Section :	6.1 Généralités	
Article :		Version : mai 2016

Géotechnique :

- Avant-projet

Un bureau de géotechnique sera contacté pour définir les grandes lignes stratigraphiques au droit du tracé envisagé et les zones susceptibles de faire l'objet d'une reconnaissance plus détaillée.

- Projet définitif

Il intégrera les données déterminées lors de l'avant-projet.

- Projet d'exécution et contrôle

Le géotechnicien contrôlera à l'avancement la qualité des fonds de fouilles (essai de plaques type M_E , petit pénétromètre, etc) et définira, le cas échéant, les mesures complémentaires nécessaires.

Pose ancienne :

La pose sur traverses en bois est abandonnée depuis longtemps

Jusque dans les années 1990 les voies étaient posées sans traverses selon le mode d'exécution suivant :

- Terrassement, réglage et contrôle du fond de fouille
- Calage des deux rails sur des plots en ciment.
- Boulonnage d'entretoises métalliques entre les rails et fixation des semelles d'ancrage en fonte au patin des rails.
- Soudure aluminothermique des rails
- Contrôle de la géométrie
- Bétonnage de la semelle de fondation qui enrobe les ancrages des rails.

Ce mode de pose est abandonné.

Mode de pose traditionnel actuellement utilisé : (voies sans exploitation)

Les voies sont soit prémontées en ateliers par coupons de 18 m de longueur comportant l'ensemble rail – traverses soit montées sur site.

Les traverses sont de types bi-blocs ou monoblocs. Les bi-blocs en béton préfabriqué fretté sont reliés entre eux par une cornière métallique. Le système d'attache est incorporé aux traverses

Dans les zones de branchement, des traverses béton monoblocs de longueur variable sont utilisées. Elles comportent une gorge de fixation sur toute leur longueur (voir 6.2.1 page 2)

Après terrassement et contrôle du fond de fouille une première couche de béton est posée. Lorsque la résistance de cette dernière le permet, les coupons sont amenés sur le chantier au moyen de remorques routières et posés à la grue sur pneus.

Des vérins à vis traversant les traverses permettent le réglage de la voie. Le bétonnage de la deuxième couche d'infrastructure enrobe les traverses (voir 6.2 « Pose traditionnelle »).

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre :	6. Infrastructure	6.1 / 2
Section :	6.1 Généralités (suite)	
Article :		Version : mai 2016

Les différents types de traverses mentionnées sous 6.2.1 p. 1 à 3 représentent quelques modèles couramment utilisés.

Il existe plusieurs autres systèmes (consulter la documentation des fournisseurs).

Des traverses à épingles sont moins épaisses et moins lourdes, elles permettent la réalisation de plate-formes de plus faible épaisseur.

Les épingles (armatures en attentes) contribuent à un meilleur ancrage de la voie dans la pose béton. Voir aussi chapitres 10.1.3 à 10.1.5.

Protection des attaches des traverses béton

Les attaches et boulons de fixation du rail seront protégés de tout contact par la mise en place d'un capot plastique résistant et aéré.

Ce capot est réalisé en polypropylène il devra rester stable chimiquement et géométriquement. Le profil de la protection épouse la forme de la traverse, des attaches et de l'écrou. Il permet un montage rapide avec blocage axé sur l'écrou et facilite son incorporation dans la chambre d'éclissage éventuelle.

Il devra résister à l'agression des produits pétroliers, à l'alcalinité des bétons et aux ultraviolets : température de 60° C ainsi qu'aux chocs et aux piétinements des ouvriers.

Cette protection sera mise en place sous revêtements de tous types après graissage des écrous. Les capots plastiques appliqués sous un revêtement enrobé devront résister à une température de 170° C.

Dans les appareils de voie, les capots plastiques seront remplacés par la pose de cabochons sur tous les écrous isolés.

Chambre d'éclissage

Le matériau de remplissage est profilé de manière à s'adapter parfaitement au profil du rail, y compris sur les sections comportant les attaches et boulons de fixation. Les caractéristiques du matériau doivent être données par le fournisseur en compatibilité avec le mode de pose et le revêtement prévu.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre :	6. Infrastructure	6.1 / 3
Section :	6.1 Généralités (suite)	
Article :		Version : mai 2016

Les pièces ne doivent pas tourner dans les chambres d'éclissage. Pour cela, elles doivent être maintenues en place par collage sur le rail et entre elles afin d'assurer le jointoiment entre les éléments profilés, de manière à éviter toute migration d'éléments fins du lit de pose de revêtement.

Le collage sur les rails se fait par points avant la mise en œuvre du béton de calage.

Dans les courbes, ces éclisses seront découpées en éléments permettant et acceptant la courbe du rail. Elles s'adapteront au plus près de la forme des capots de protection des attaches après découpage.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.2 / 1
Section : 6.2	POSE TRADITIONNELLE	Version : mai 2016
Article : 6.2.1	Traverses	

1.1 Traverses bi-blocs



Une des particularités de la traverse bi-bloc réside dans une entretoise métallique vrillée qui peut permettre le passage d'un drain central d'assainissement.

Remarque : ces traverses existent aussi avec une entretoise métallique non vrillée.



Remarque: voir aussi art. 6.3.9 et 6.3.10

Directives techniques pour TRAM	section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure	6.2 / 2
Section : 6.2 POSE TRADITIONNELLE	Version : mai 2016
Article : 6.2.1 Traverses (suite)	

1.2 Traverses monoblocs

POSE RECOMMANDEE PAR LES TPG



Traverses type « Vigier Rail »

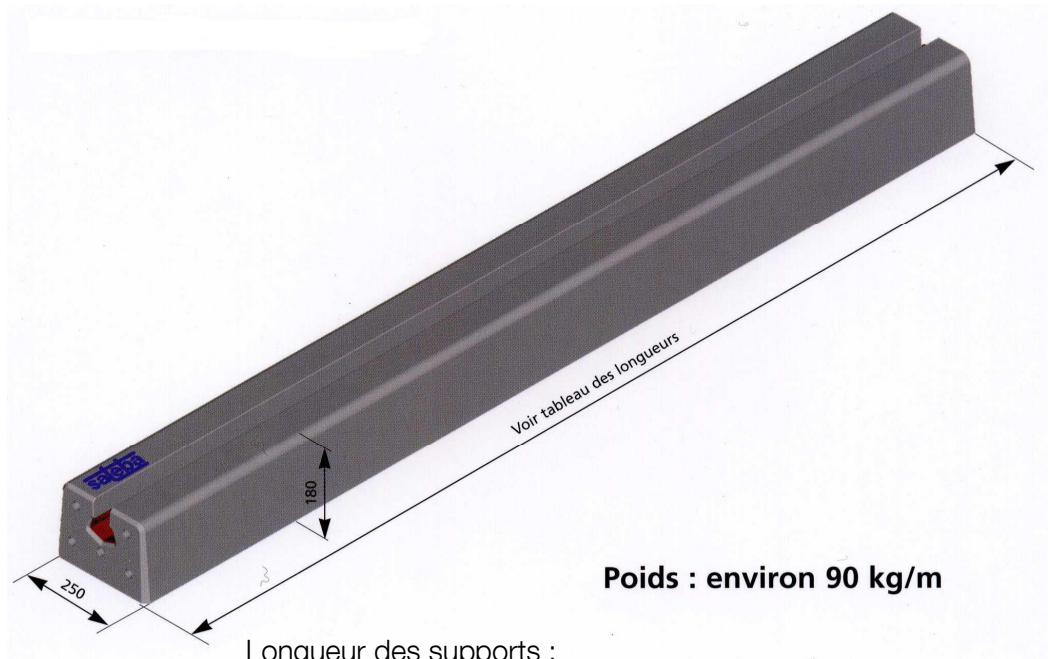
Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.2 / 3
Section : 6.2	POSE TRADITIONNELLE	Version : mai 2016
Article : 6.2.1	Traverses (suite)	

1.3 Traverses monoblocs type « branchements »

Elles sont utilisées pour la pose des appareils de voie car elles permettent la fixation et le réglage des rails au moyen d'une gorge de fixation, sur toute leur longueur qui est variable.

Ces traverses sont généralement précontraintes.

Remarque : la rainure (gorge de fixation) doit être soigneusement colmatée pour éviter toute stagnation d'eau.



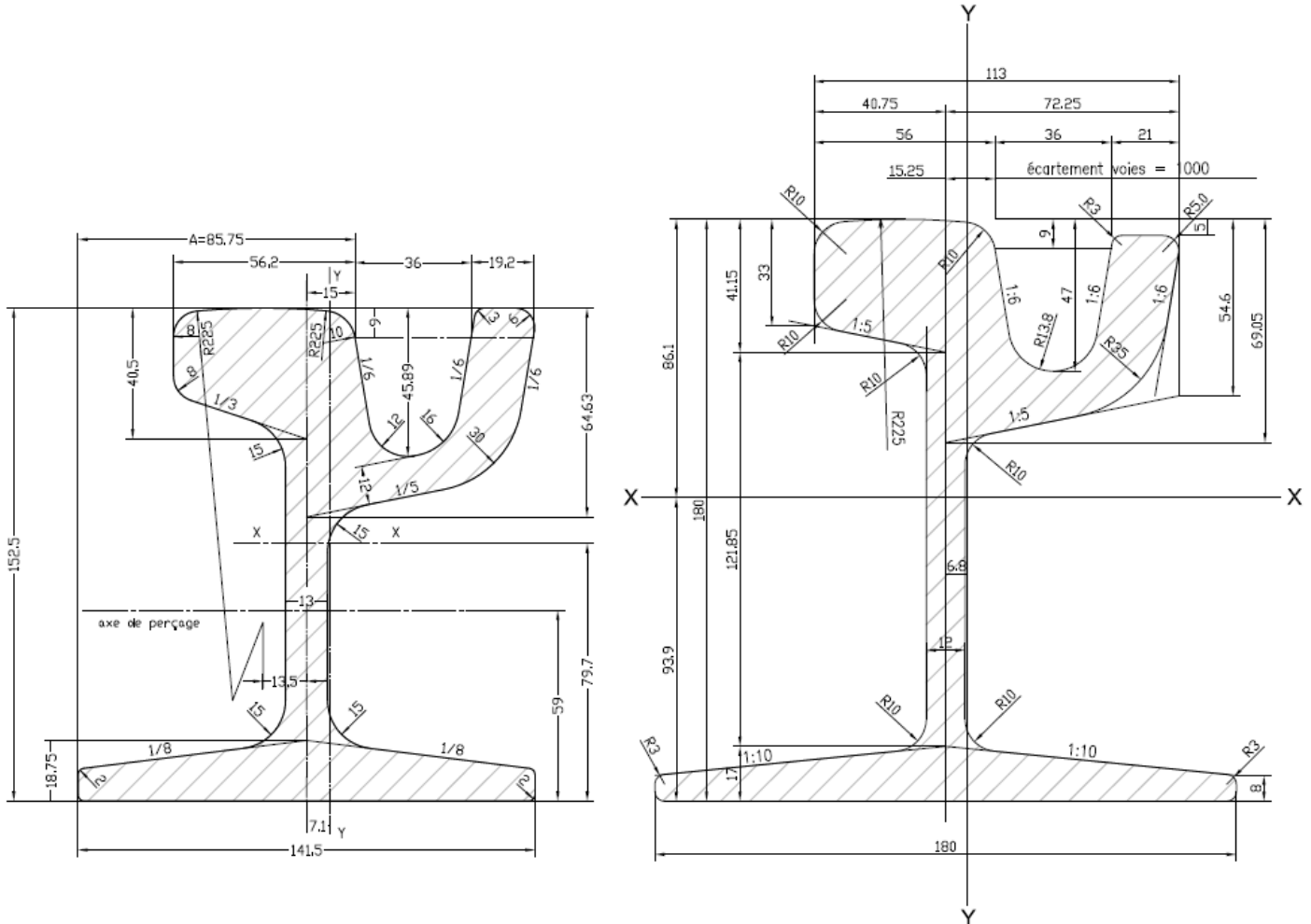
Longueur des supports :

0,88 / 2,38 / 2,63 / 2,88 / 3,38 / 3,63 / 4,13



2.2 Types 60-R1 et 55-G1

Profils abandonnés par les TPG à partir du 1er janvier 2016.



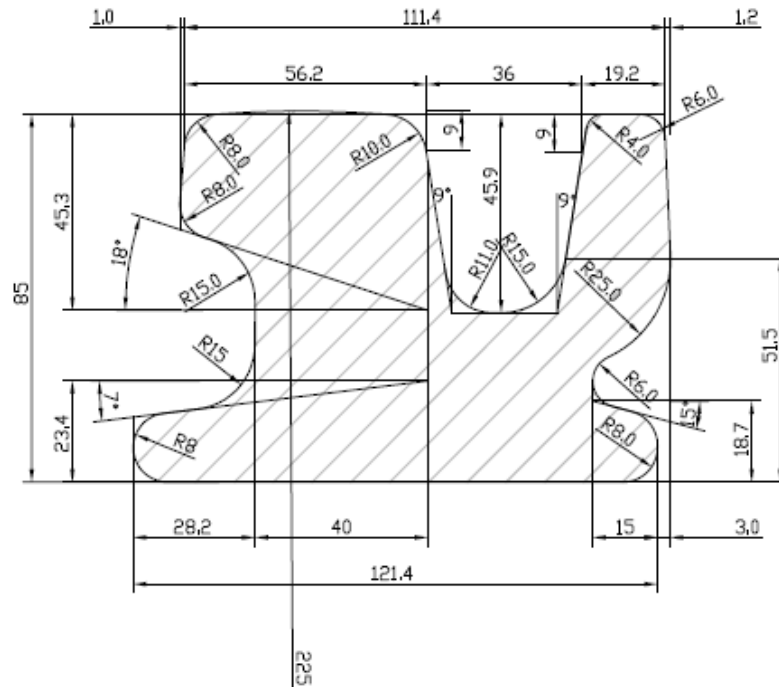
cotes en mm

Dénomination	55-G1
Section (mm ²)	6978
Masse (kg/m)	54,78
Ix (cm ⁴)	2076
Iy (cm ⁴)	682
Ix/y (cm ³)	260
Iy/u (cm ³)	88

Dénomination	60-R1
Section (mm ²)	7705
Masse (kg/m)	60.48
Ix (cm ⁴)	3334
Iy (cm ⁴)	884
Ix/y (cm ³)	355
Iy/u (cm ³)	130

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.2 / 6
Section : 6.2	POSE TRADITIONNELLE	Version : mai 2016
Article : 6.2.2	Rails (suite)	

2.3 Type 35GPB



cotes en mm

Dénomination	35GPB
Section (mm ²)	7330
Masse (kg/m)	57.60

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.2 / 7
Section : 6.2 POSE TRADITIONNELLE		Version : mai 2016
Article : 6.2.3 Comparatif des poses de voies courantes		

TABLEAU RECAPITULATIF

TYPE DE POSE DE VOIE	Caractéristiques techniques (Rail 55-G2 Corps de plate-forme : béton)	Protection contre les courants vagabonds	Hauteur totale de la plate-forme	Maintenance	Tenue dans le temps
POSE SUR TRAVERSES BETON NOYÉES DANS DU BETON	Pose sur appuis discontinus : (traverse et attache élastique)	Chambre d'éclissage et attaches (butée nylon)	70 cm maxi 55 cm mini	Plus ou moins aisée en fonction des revêtements	Très bonne
POSE BALLASTÉE	Pose sur appuis discontinus : (traverse et attache élastique)	Inutile	95 cm	Nivellement à surveiller. Facile mais avec matériel adapté	Bonne
POSE DEPHI POSE DS-ISORAIL	Pose sur appuis discontinus : (traverse et attache élastique)	Chambre d'éclissage et attaches (butée nylon)	70 cm maxi 55 cm mini	Plus ou moins aisée en fonction des revêtements	Très bonne pour la voie en cours pour les semelles anti-vibratiles.
POSE TRAVERSES ASP	Pose sur appuis discontinus : (traverse et attache élastique)	Chambre d'éclissage et attaches (butée nylon)	70 cm maxi 55 cm mini	Plus ou moins aisée en fonction des revêtements	Très bonne pour la voie en cours pour les semelles anti-vibratiles.
POSE STEDEF	Pose noyée sur appuis discontinus : (traverse et attache élastique)	Inutile	Sur ouvrage d'art : 45 cm	Plus ou moins aisée en fonction des revêtements	Bonne
POSE EDILON CORKELAST	Pose noyée sur appui continu matériau élastique	Par le produit de calage	60 cm	Destruction de l'appui pour tout entretien : rechargement ou changement	Pas de référence de grande longueur en France
POSE DALLE FLOTTANTE SUR TAPIS CONTINU	Pose sur appuis discontinus : (traverse et attache élastique)	Chambre d'éclissage et attaches (butée nylon)	83 cm	Plus ou moins aisée en fonction des revêtements	Très bonne
POSE DALLE FLOTTANTE SUR PLOTS INDEPENDANTS	Pose sur appuis discontinus : (traverse et attache élastique)	Chambre d'éclissage et attaches (butée nylon)	80 cm	Plus ou moins aisée en fonction des revêtements	Très bonne
POSE DIRECTE	Pose sur appuis discontinus : (traverse et attache élastique)	Chambre d'éclissage et attaches (butée nylon)	Sur ouvrage d'art : 23 cm	Difficile car associé à des revêtements scellés	Bonne

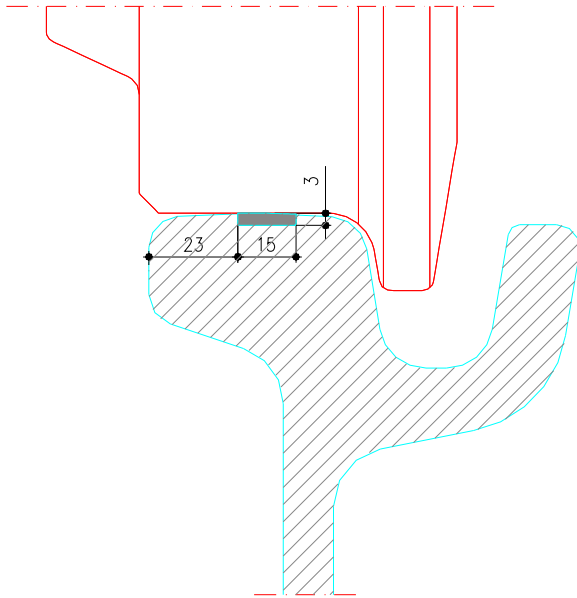
Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.2 / 8
Section : 6.2 POSE TRADITIONNELLE		Version : mai 2016
Article : 6.2.4 Cordon anti-usure		

Pour augmenter la longévité des rails, des cordons anti-usures sont réalisés selon le processus suivant :

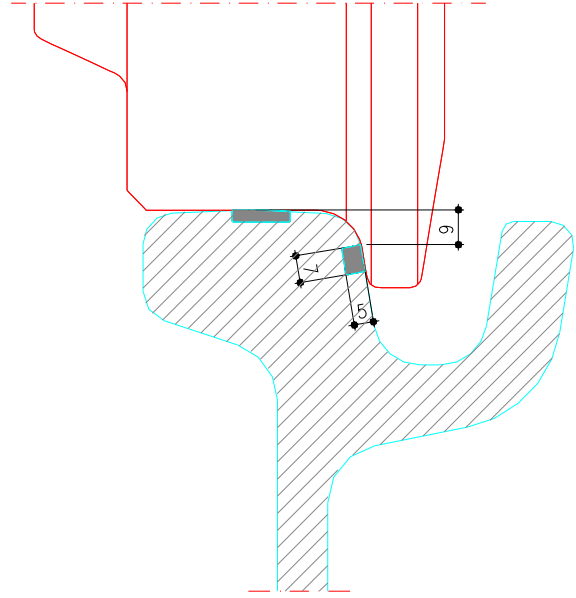
1. Fraisage du rail.
2. Application du cordon anti-usure au moyen d'un engin ad hoc (voir photo).
3. Meulage des cordons.

Ce traitement est à réaliser avant la pose des tapis bitumineux définitifs.

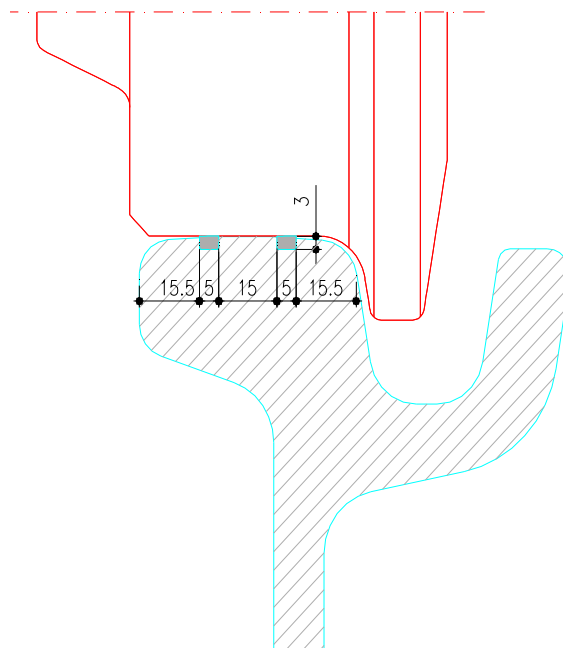




En alignement



En courbe



Cordon double

cotes en mm

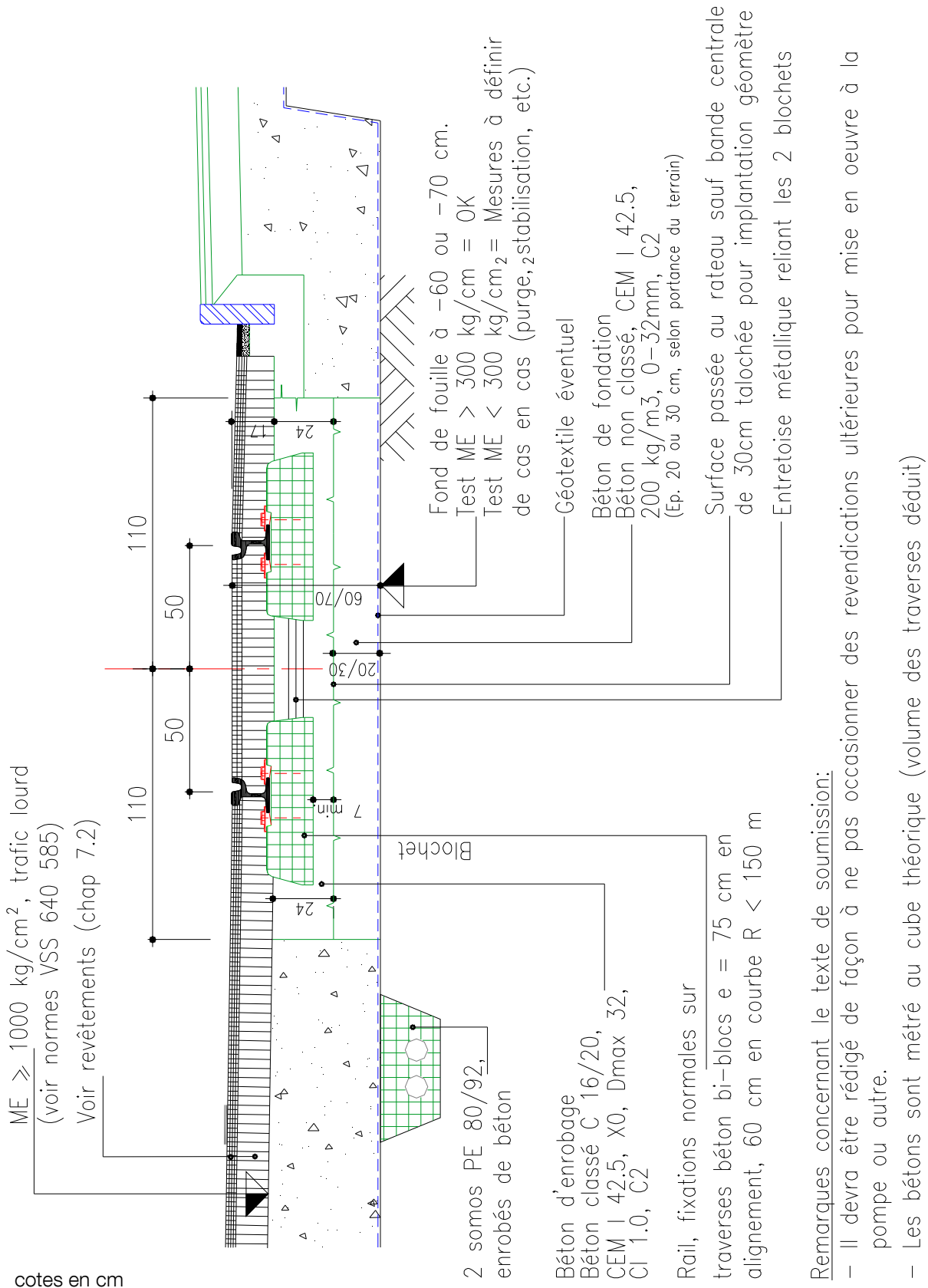
Chapitre : 6. Infrastructure

6.2 / 10

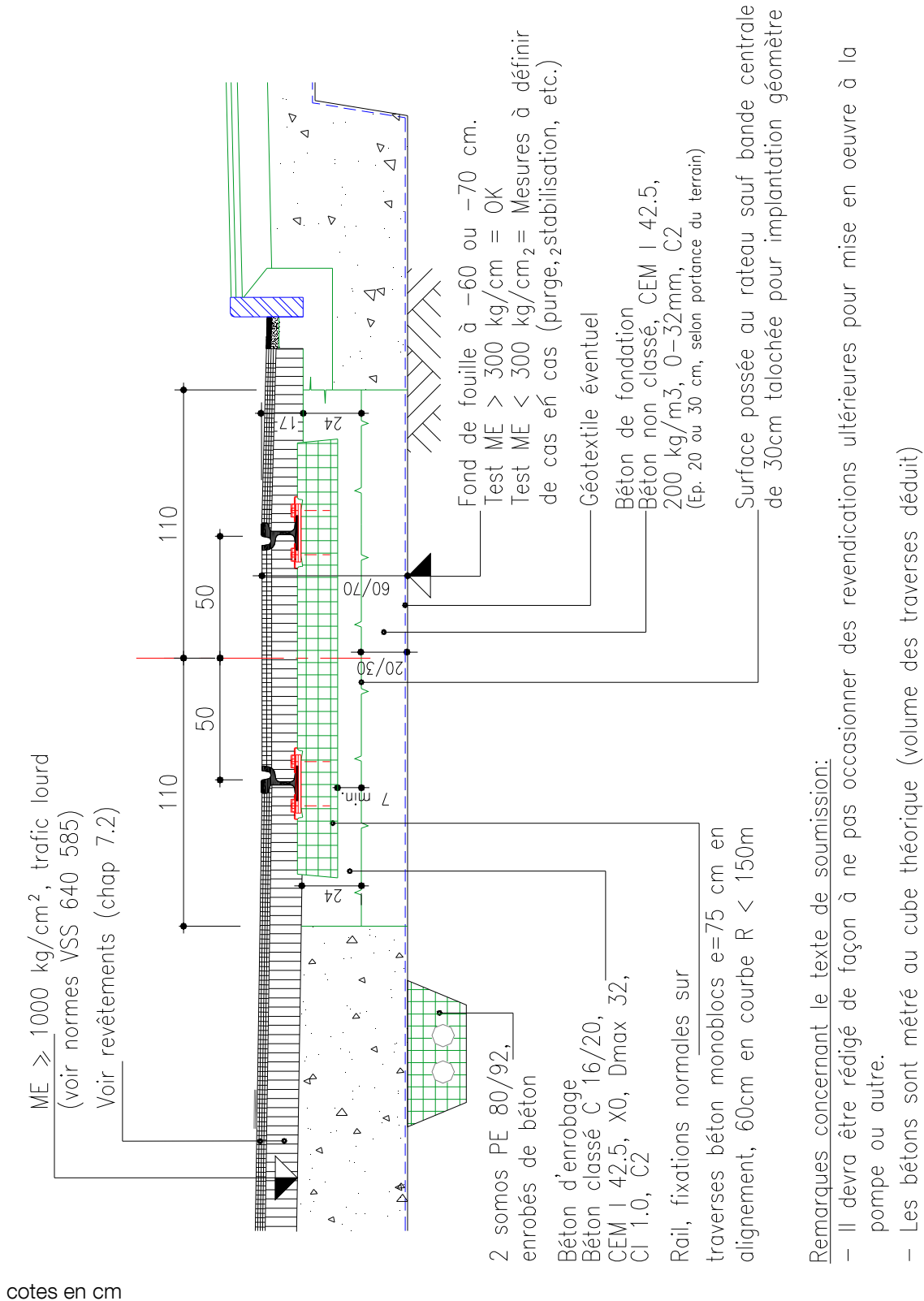
Section : 6.2 POSE TRADITIONNELLE

Article : 6.2.5 Coupe type avec traverses bi-blocs

Version : mai 2016



Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.2 / 11
Section : 6.2 POSE TRADITIONNELLE		Version : mai 2016
Article : 6.2.5 Coupe type avec traverse monobloc Pose recommandée par les TPG		



cotes en cm

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.2 / 12
Section : 6.2	POSE TRADITIONNELLE	Version : mai 2016
Article : 6.2.5	Coupe type (suite)	

Béton de structure :

Les préconisations des épaisseurs indiquées sous 6.2.3 p. 7 sont liées à la préconisation de la traverse. Il existe aujourd'hui des traverses moins épaisses permettant de diminuer l'épaisseur du béton de calage.

Dans le dimensionnement de la structure tramway seule l'épaisseur du béton située sous la traverse est prise en compte, en l'occurrence une épaisseur minimum de 7 cm est indispensable sous la traverse, cette hauteur nous assure une bonne mise en œuvre du béton par vibration sous les traverses. C'est donc pour cette raison que la diminution de l'épaisseur de la traverse a été un gain dans la structure de la plate-forme.

Il convient également de rappeler que ce dimensionnement est basé sur l'utilisation des bétons non armés. Nous avons pu noter dernièrement que l'utilisation des bétons armés ou fibrés nous ont permis de diminuer l'épaisseur totale de la plate-forme. Ce gain en épaisseur ne s'est pas transformé en gain financier du fait de l'utilisation de techniques de génie civil plus sophistiquées.

Concernant la largeur du béton de fondation et du béton de calage des voies, il est souhaitable, dans la mesure du possible, que cette largeur corresponde à la surface des revêtements mis en œuvre sur la plate-forme. Cette préconisation a pour but, dans le cas de revêtements rigides ou semi-rigides, de posséder une seule et unique fondation et d'éviter ainsi des tassements différentiels induits par des structures de plate-forme différentes.

Ces tassements génèrent la plupart du temps des fissures en surface du revêtement. La fondation des bordures délimitant la plate-forme peut aussi reposer sur le fond de forme du terrassement.

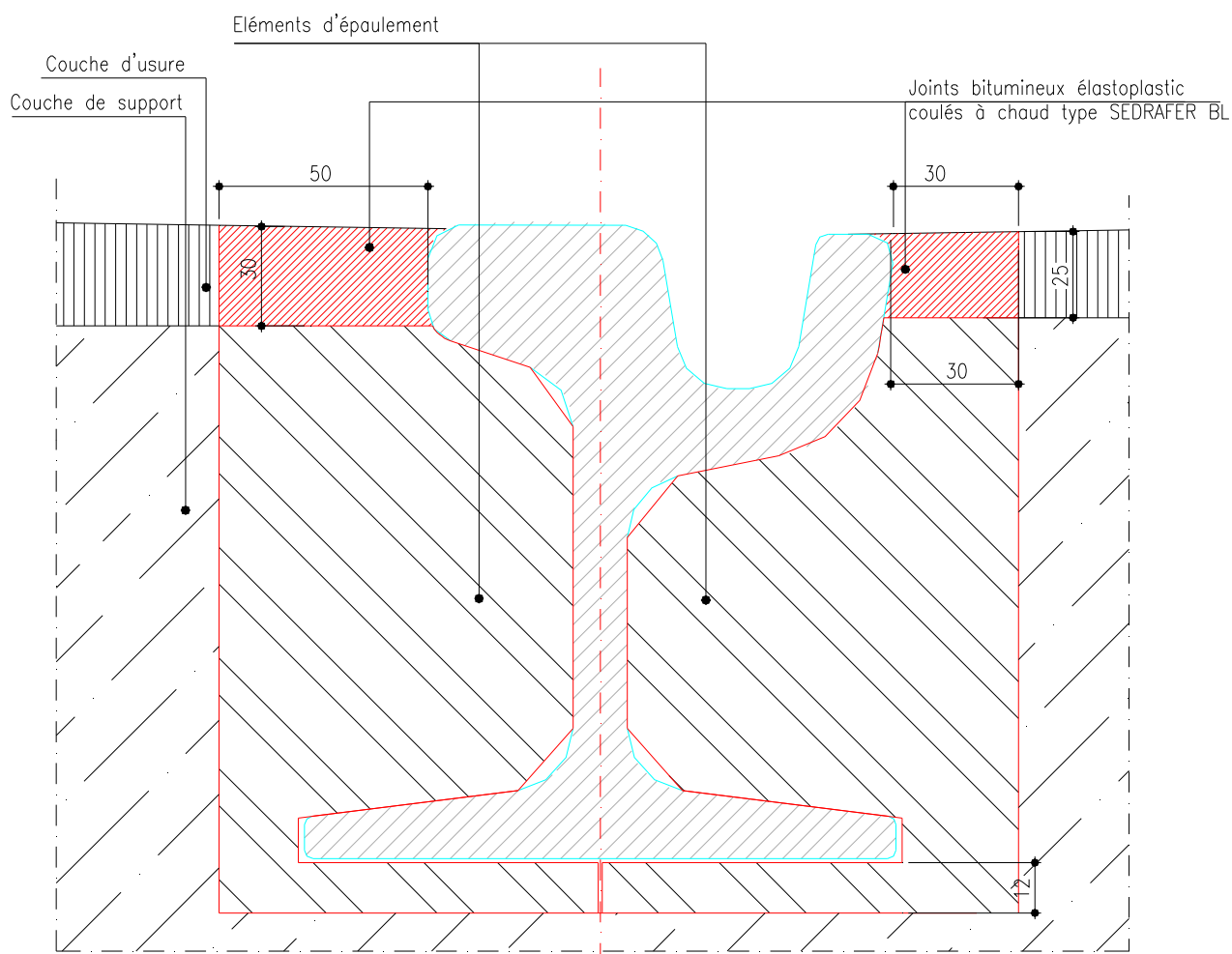
Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.2 / 13
Section : 6.2	POSE TRADITIONNELLE	Version : mai 2016
Article : 6.2.5	Coupe type (suite)	

Isolation du rail

Principe d'exécution de joints bitumineux élastoplastique coulés à chaud (Type SEDRA ou similaire).

Des éléments d'épaulement en caoutchouc recyclé peuvent être prévus pour permettre l'absorption des vibrations du rail et empêcher la diffusion des courants vagabonds dans ce cas, afin de pouvoir absorber une flexion du rail, sans provoquer de fissures dans la voirie, un joint spécifique est réalisé, au moyen d'engins ad hoc, selon le processus suivant :

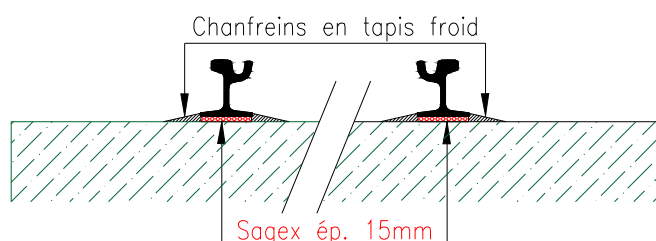
1. Fraisage.
2. Nettoyage du joint.
3. Sablage des flancs extérieurs du rail.
4. Application d'une couche de résine époxy sur les surfaces sablées avec pulvérisation de sable siliceux fin et mise en place d'une couche d'apprêt à haute adhérence SEDRAPIX VHK.
5. Remplissage à chaud avec le mastic de coulage SEDRAFER BL.



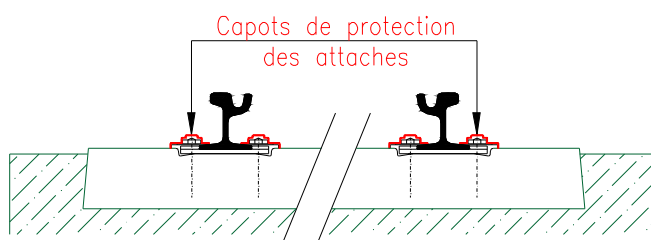
Attention : dans le cas d'un « système isolé » contre les courants vagabonds ou autre, les tresses de liaison doivent être noyées dans un système également isolé (type EDILON ou similaire).

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre :	6. Infrastructure	6.2 / 14
Section :	6.2 POSE TRADITIONNELLE	
Article :	6.2.5 Coupe type (suite)	Version : mai 2016

Entre chaque traverse



Au droit de chaque traverse



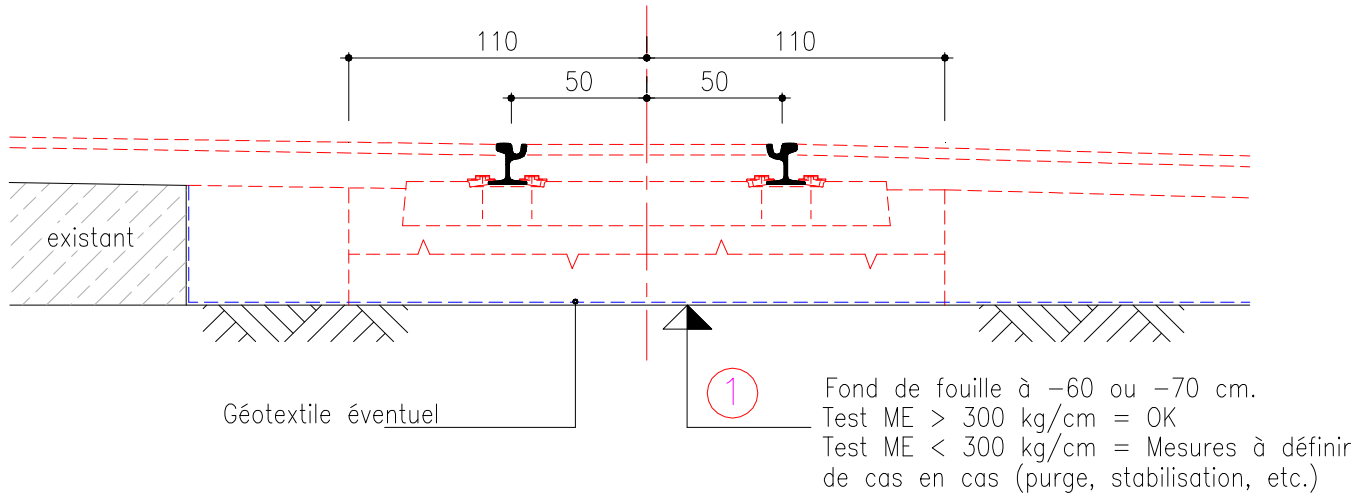
Pour que le rail porte de traverse à traverse, il ne faut pas que le rail soit en contact avec la dalle béton. Pour ce faire, des bandes de « sagex » sont scotchées sous le patin du rail avant le bétonnage de la dalle supérieure. Pour éviter que ce « sagex » soit détérioré lors de la mise en place des enrobés bitumineux, un chanfrein de tapis froid est exécuté de part et d'autre du rail.

Afin de faciliter l'entretien des voies et de permettre un dévissage rapide des attaches, des capots plastiques sont clipsés sur ces dernières avant le bétonnage de la dalle supérieure.

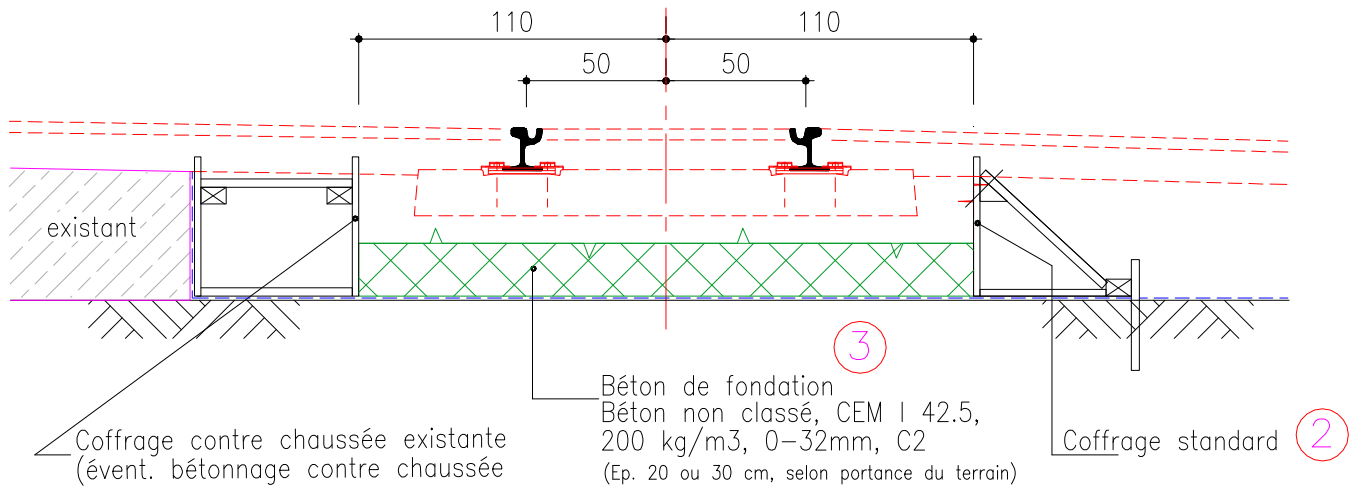


Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.2 / 15
Section : 6.2 POSE TRADITIONNELLE		Version : mai 2016
Article : 6.2.6 Etapes de construction		

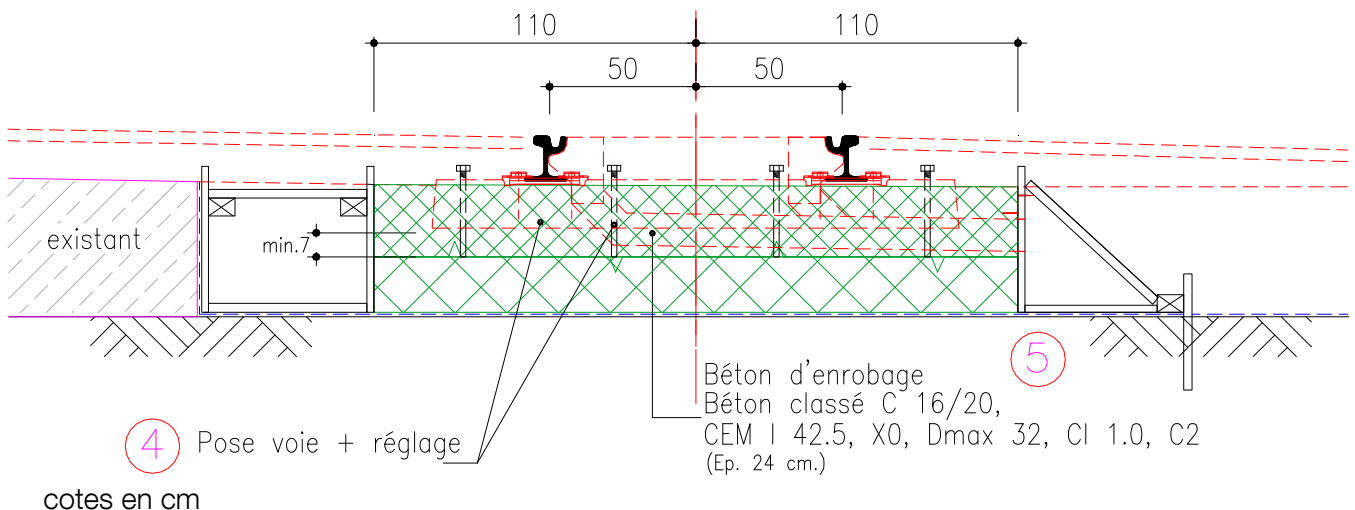
1. PREPARATION DE LA FONDATION



2. BETONNAGE DE LA DALLE DE FONDATION



3. POSE DE LA VOIE, NIVELLEMENT ET ENROBAGE DES TRAVERSES



Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.2 / 16
Section : 6.2 POSE TRADITIONNELLE		Version : mai 2016
Article : 6.2.7 Evacuation des eaux de surface		

Généralités

L'emploi de boîtes de drainage est généralement retenu pour un revêtement tel que l'enrobé et principalement dans les sites banalisés. Dans les sites propres, des caniveaux entre rails sont envisageables.

Evacuation de l'eau en surface de la plate-forme

Principe retenu :

- Les boîtes de drainage écoulent les eaux de la gorge des rails uniquement.
- L'écoulement des eaux de surface de l'ensemble de la chaussée, zone ferroviaire comprise, est assuré par les sacs de la voirie et doivent être conformes aux directives de cette dernière.

Evacuation des eaux d'infiltration

Le captage des eaux d'infiltration s'effectue au niveau du béton de voie, sous le corps du revêtement. Un bon assainissement impose des formes de pentes au béton de voie, et des réservations pour la mise en place de drains agricoles diamètre 50 mm. Les drains se raccordent aux assainissements transversaux, situés tous les 40 mètres environ.

Ce principe s'applique aux revêtements, pavés béton autobloquants posés sur concassé, gazon, stabilisé, bicouche, concassé 30/40, n'apparaît pas nécessaire pour les enrobés réalisés sur grave bitume ou béton et les revêtements scellés du fait de leur très faible perméabilité.

Evacuation de l'eau située dans la gorge des rails

Elle se fait au moyen de lumières réalisées dans la bavette du rail, l'eau se déverse dans des boîtes à eau, des boîtes d'écoulement ou des caniveaux. Cette lumière, réalisée au droit des sacs de route impérativement dans les points bas de profils en long, doit avoir la plus grande section possible et cela en fonction de son réceptacle. Nous notons souvent que les orifices trop petits se bouchent avec quelques feuilles ou mégots, d'où l'intérêt de la pleine section.

L'emplacement précis des points bas et de la lumière revêt une certaine importance afin d'éviter la stagnation en flaque et l'éventualité du gel de l'eau dans la gorge.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.2 / 17
Section : 6.2	POSE TRADITIONNELLE	Version : mai 2016
Article : 6.2.7	Evacuation des eaux de surface	

Boîtes de drainage

S'insérant dans le profil du rail, elles possèdent une attente d'évacuation, diamètre 100 mm extérieur, facilitant l'entretien, qui sera raccordée sur un réseau transversal de section appropriée, ce réseau est noyé dans le béton de fondation de la plate-forme.

Dans la mesure du possible, prévoir un regard de visite permettant un curage efficace du système de drainage.

Caniveaux de drainage entre rails

Envisageables dans les sites propres, ils permettent de collecter des débris de surface éventuels et facilitent l'accessibilité aux drains récupérant les eaux d'infiltration qui seront raccordés dans des pré-marques ou attentes prévues à cet effet. Ils seront réalisés en béton polymère armé de grille inox ou autre. Ils possèdent un fil d'eau horizontal et des pré-marques afin de récupérer les drains servant à collecter les eaux d'infiltration. Les caniveaux proposés doivent présenter des tests de résistance simulant l'effort de freinage d'un véhicule routier circulant sur la plate-forme et la prise en compte des efforts de dilatation. Les grilles de surface seront en fonte ductile carrossable munies d'un système de verrouillage.

Les caniveaux se raccorderont sur un réseau de diamètre 125 mm minimum inséré dans le béton de voie.

Assainissement des appareils de voies

Les appareils de voies s'assainiront de façon identique dans tous les sites, associés à tous les types de revêtements.

Le principe proposé se compose :

- de boîtes de drainage placées de part et d'autre de l'appareil de voie en fonction des pentes.
- d'un carter raccordé contenant le mécanisme de l'appareil de voie.

Dans le cas d'un revêtement non étanche, l'évacuation des eaux d'infiltration se fera toujours par la création de forme de pente sur le béton de calage de la voie. Des drains longitudinaux se placeront dans les réservations prévues à cet effet. Ces drains de section 150 mm se raccorderont, soit dans les fosses, soit dans le réseau de canalisations de la chaussée.

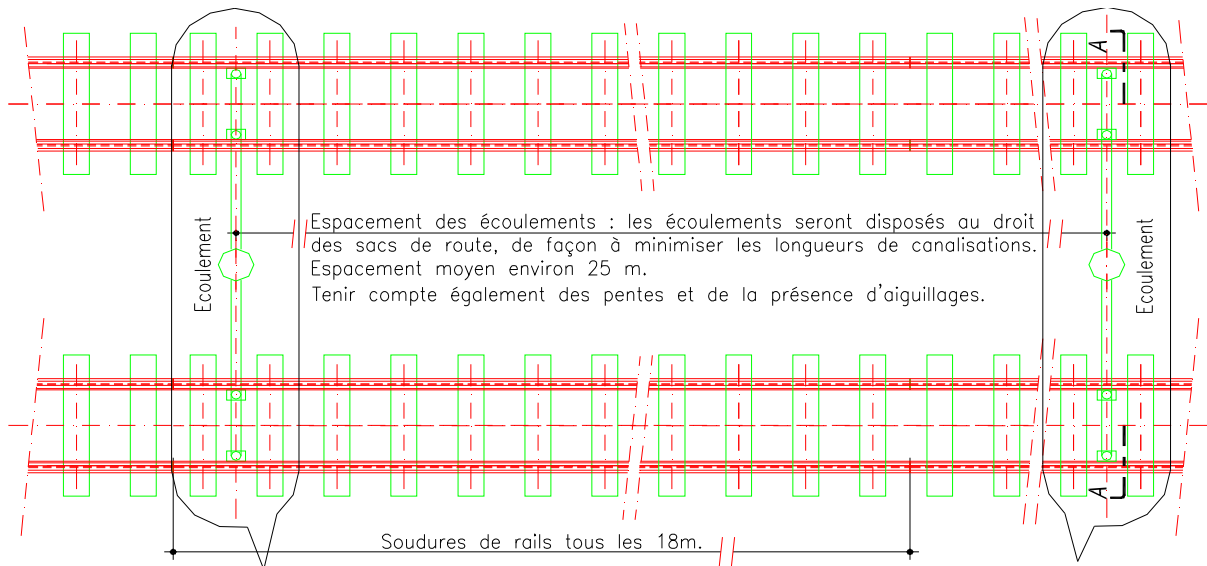
Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.2 / 18
Section : 6.2	POSE TRADITIONNELLE	Version : mai 2016
Article : 6.2.7	Evacuation des eaux de surface	

Regard de visite au droit des drainages

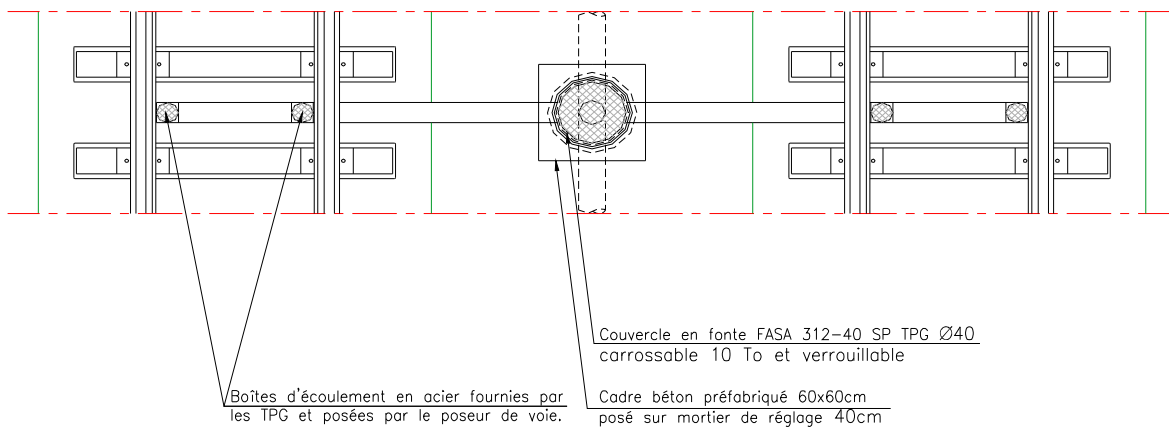
Au droit des diverses solutions de captation des eaux de surface, il est préconisé de prévoir un regard de visite permettant le nettoyage du drainage transversal.

Chaque regard possèdera une décantation, et si possible sera implanté hors distances de sécurité (voir chapitre 5). Il se raccordera au réseau eaux pluviales de la ville.

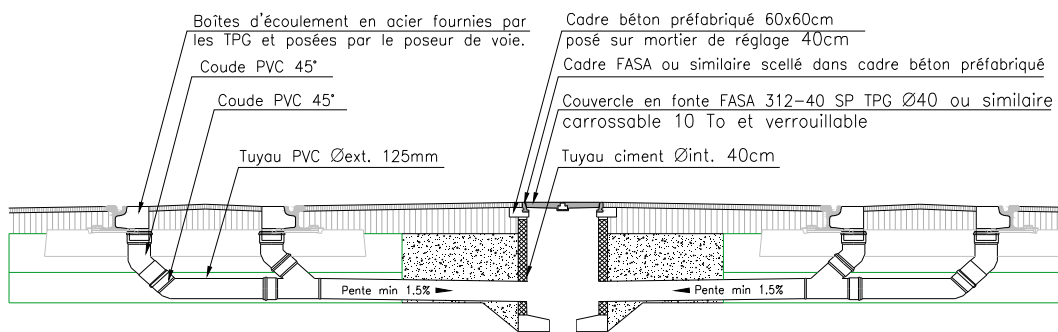
Vue en plan générale



Vue en plan détaillée



Coupe A-A





LIGNE 13 – Bd G.-Favon (traverses bi-blocs)



LIGNE 13 - Place du Cirque (traverses bi-blocs)

LIGNE 15 – Place du 1^{er} Août (traverses monoblocs)

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.3 / 1
Section : 6.3	MESURES ANTIVIBRATOIRES	Version : mai 2016
Article : 6.3.1	Généralités	

1.1 Vibrations et bruit solidien

Les oscillations vibratoires engendrées par le passage d'un tramway se propagent à travers le sol jusqu'aux bâtiments situés au voisinage de la voie. A l'intérieur du bâtiment, ces oscillations sont perçues par le corps humain en tant que « vibrations ». De plus, les planchers et murs oscillants engendrent un mouvement vibratoire de l'air, dit son ou bruit « solidien » ou « régénéré » du fait qu'aux fréquences supérieures à 25 Hz, il est perçu en tant que son par les êtres humains.

Contrairement au bruit dit « aérien » qui est transmis directement par l'air, on ne peut pas se protéger contre le bruit solidien par exemple en fermant les portes et fenêtres.

En règle générale, l'impact des vibrations et du son solidien représente le seul problème environnemental qui peut imposer l'adoption de mesures préventives.

1.2 Cadre légal

A partir d'un certain seuil, ces vibrations ou ce bruit solidien, sont perçus comme nuisances. La limitation de ces nuisances découle de la loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) qui, notamment dans son article 11, définit les **mesures préventives** à prendre au moment de la construction de nouvelles installations ou lors de transformation d'installations existantes.

L'article 9 de la LPE définit globalement la procédure de **l'étude d'impact** sur l'environnement.

L'ordonnance fédérale relative à **l'étude de l'impact** sur l'environnement (OEIE) comporte une liste exhaustive des installations qui sont soumises à cette procédure ainsi que leur déroulement.

Alors qu'en matière de protection contre le bruit aérien, l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) est entrée en vigueur en 1987, il n'existe à ce jour aucune ordonnance relative aux vibrations fixant les valeurs limites de nuisances. Par contre, l'office fédéral de l'environnement (OFEV) et l'office fédéral des transports (OFT) ont arrêté, le 04.10.1999, une nouvelle directive pour l'évaluation des vibrations et du bruit solidien, applicable aux installations ferroviaires (y inclus tramway).

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.3 / 2
Section : 6.3	MESURES ANTIVIBRATOIRES	Version : mai 2016
Article : 6.3.1	Généralités (suite)	

Cette directive fait référence à la norme allemande DIN 4150, partie 2, édition 1999, en ce qui concerne les vibrations, et contient des valeurs limites pour le bruit solidien.

Il est prévu d'affiner et de compléter cette directive pour qu'elle devienne applicable à tous les cas de vibrations et bruit solidien et de la transformer en ordonnance.

La norme suisse SN 640312a donne les valeurs limites pour ce qui concerne les niveaux des **vibrations** dommageables aux bâtiments et aux structures.

Toutefois, sauf dans des cas très spéciaux, c'est pratiquement toujours la protection de l'humain (norme DIN 4150 + directive) qui est déterminante.

Les valeurs limites dépendent du type de zone traversée (habitation, commerciale, industrielle, mixte) et des plages horaires jour et nuit.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.3 / 3
Section : 6.3	MESURES ANTIVIBRATOIRES	Version : mai 2016
Article : 6.3.2	Pronostics des vibrations	

2.1 Paramètres principaux

Lors du pronostic des nuisances, il faut non seulement se baser sur la distance entre voie et façade, mais tenir compte :

- du type et donc du comportement dynamique des bâtiments le long des tracés - la différence de sensibilité entre deux bâtiments peut compenser une différence de distance par rapport à la voie jusqu'à 10 m ou plus dans les cas extrêmes,
- du mode d'affectation des bâtiments en question, selon lequel les valeurs indicatives de nuit - plus contraignantes - ou de jour sont à respecter.
- de l'exploitation prévue de la future ligne.
- de l'emplacement des appareils de voie, (aiguillages, croisements,...)

2.2 Mesure des émissions vibratoires du tram genevois

Les niveaux de vibrations et de son solidien doivent être pronostiqués dans le cadre des études d'impact pour les nouvelles lignes de tramway. Un élément clé d'un tel pronostic est le spectre d'émission des rames qui circuleront sur la ligne en question. Etant donné l'ampleur des projets de construction de nouvelles lignes de tramway, de nouvelles mesures in situ ont été réalisées dans le but de :

- déterminer (réactualiser) le spectre d'émission du tram genevois,
- mesurer l'émission du nouveau type de rames (Bombardier City Runner série 05),
- déterminer la majoration de l'émission due aux aiguillages,
- déterminer la majoration qui résulte d'une courbure de la voie,
- mettre en évidence l'influence de la nature du sol,
- caractériser l'atténuation en fonction de la distance à la voie.

Des mesures in situ ont été effectuées, lors de l'exploitation normale, à trois différents types d'endroits : lignes droites (Bd James Fazy – rue de la Servette ainsi que rue de Lausanne – rue Rothschild), aiguillages (Eglise Notre-Dame, Bachet de Pesay et Plainpalais) et courbures (rue de Lausanne – av. de France et place des Nations). De plus, des mesures ont été menées en dehors des heures d'exploitation du réseau, avec des rames test, en ligne droite, à Lancy et rue de Lausanne – rue Rothschild.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.3 / 4
Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES		
Article : 6.3.2 Pronostics des vibrations (suite)		Version : mai 2016

2.3 Variabilité d'un point de mesure à l'autre

La grande quantité de points de mesure auxquels les vibrations émises par le tramway ont été enregistrées permet de mettre en évidence une très grande variabilité d'un point de mesure à l'autre, pour une même distance à la voie, le même type de rame et la même situation de voie. Dans le cadre des pronostics pour les études d'impact, ce constat renforce la justification de toujours mesurer l'émission sur le trottoir en deux points devant le bâtiment, et d'en utiliser la moyenne pour calculer les spectres de transfert du bâtiment.

2.4 Influence du type de rame

Une comparaison des spectres d'émission mesurés, pour les anciennes et nouvelles rames, permet de mettre en évidence les caractères suivants :

- Les anciennes rames produisent plus de vibrations à basse fréquence, autour de 25 Hz, ce qui est plus défavorable pour la perception des vibrations, en particulier quand les fréquences propres des dalles se situent entre 20 et 30 Hz.
- Les nouvelles rames, par contre, produisent plus de vibrations au-delà de 40 Hz. De ce fait, les nouvelles rames génèrent plus de son solidien, qui résulte de l'émission des vibrations haute fréquence.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.3 / 5
Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES		Version : mai 2016
Article : 6.3.2 Pronostics des vibrations (suite)		

2.5 Atténuation en fonction de la distance à la voie

En théorie de propagation des ondes, l'atténuation de l'amplitude d'une onde viscoélastique s'écrit :

$$A(r) = A_0 (r_0/r)^n e^{-a(r-r_0)} \quad (1)$$

Le terme $(r_0/r)^n$ reflète l'atténuation géométrique, avec $n = 0$ pour l'onde de surface émise par une source linéaire, et $n = 0.5$ pour l'onde de surface émise par une source ponctuelle, et avec :

- A_0 : amplitude à la distance de référence
- r_0 : distance de référence pour laquelle est valable le spectre d'émission
- r : distance à la voie.

Le terme $e^{-a(r-r_0)}$ exprime l'atténuation liée au matériau, avec $a = 2 \pi D f / V$, et

- D : amortissement,
- f : fréquence
- V : vitesse de propagation des ondes.

Il s'agit ici de l'onde de surface se propageant principalement dans la superstructure de la chaussée.

Les paramètres n , D et V ont été ajustés de manière à refléter au mieux l'atténuation mesurée aux sites genevois de Lancy et de la rue de Lausanne. Ainsi, pour les pronostics sur le réseau de tram genevois, il est proposé d'adopter la fonction d'atténuation (1), avec les valeurs $n = 0$ (source linéaire), $D = 0.075$ et $V = 400$ m/s. Ainsi, à ces distances, le champ d'ondes émis par le tram est équivalent à celui d'une source linéaire.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.3 / 6
Section : 6.3	MESURES ANTIVIBRATOIRES	Version : mai 2016
Article : 6.3.2	Pronostics des vibrations (suite)	

2.6 Aiguillages, courbures de la voie et vitesse de passage

Lors de la campagne de mesures menée, trois différentes situations de voies ont été étudiées : lignes droites, aiguillages à gorge porteuse et profonde, courbures prononcées de la voie (virage à 90°).

Dans l'ensemble, la comparaison des spectres mesurés lors des passages de tramways sur les aiguillages à gorge porteuse et profonde n'a pas permis de mettre en évidence de différence significativement importante entre ces deux types d'aiguillages.

Pour les fréquences supérieures à 50 Hz, les vibrations mesurées au droit d'une courbure prononcée sont plus faibles que celles mesurées le long d'un aiguillage, qui sont elles-mêmes plus faibles que les vibrations mesurées en ligne droite.

Si la vitesse de passage des tramways était toujours la même, il est clair que les aiguillages produiraient plus de vibrations que le passage en ligne droite. Mais dans la pratique, il s'avère que le tramway franchit les courbures à vitesse réduite, de même que pour les aiguillages qui présentent également une légère courbure du rail, tandis qu'il peut circuler à vitesse plus élevée dans les lignes de droite. De ce fait, les mesures réalisées permettent de mettre en évidence le fait que la vitesse de passage du tramway, réduite en cas de courbure ou d'aiguillage, compense et même réduit le niveau des vibrations émises par le tramway, à haute fréquence.

En revanche, pour les fréquences inférieures à 40 Hz, les aiguillages, puis les courbures, donnent lieu à une émission de vibrations plus fortes que le passage en ligne droite, malgré la vitesse de passage réduite (voir figures 1 et 2).

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.3 / 7
Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES		
Article : 6.3.2 Pronostics des vibrations (suite)		Version : mai 2016

2.7 Influence de la nature géologique du sous-sol

Des mesures comparatives ont été effectuées sur des sites de nature géologique et géotechnique très différente, qui sont représentatifs des dépôts en présence dans le sous-sol genevois :

- Lancy (vers arrêt piscine de Lancy) : 30 à 40 m de dépôts d'argiles grises,
- Intersection rue de Lausanne – rue Rothschild : moraine compacte composée de graviers.

L'observation des spectres mesurés aux deux sites montre clairement une nette influence de la nature des dépôts sur les résultats obtenus, avec les caractéristiques suivantes :

- en dessous de 30 Hz environ, les vibrations émises par le tram, à une distance donnée, sont plus fortes à Lancy qu'à la rue de Lausanne,
- tandis que pour les fréquences supérieures à environ 30 Hz, ce sont les vibrations émises par le tram à la rue de Lausanne qui sont supérieures, toujours à distance égale de l'axe de la voie.

Les spectres d'émission définis lors de la précédente campagne de mesures sont valables pour un sol de type moraine compacte. Dans le cas de sols de type argileux (sur une épaisseur d'au moins 30 m.), il est proposé d'appliquer aux spectres d'émission une fonction de correction, définie à partir du rapport entre les spectres mesurés à Lancy et ceux de la rue de Lausanne. Cette fonction est définie dans le tableau 1, pour la gamme de fréquences considérée. Dans le cas de dépôts argileux de moins de 30 m. d'épaisseur, il convient d'adapter la fonction de correction en conséquence.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.3 / 8
Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES		Version : mai 2016
Article : 6.3.2 Pronostics des vibrations (suite)		

2.8 Spectres d'émission du tram genevois

Les spectres moyens, mesurés à une distance de 6 m, en ligne droite sont proposés comme nouveaux spectres d'émission. Dans le cas où les rames anciennes et nouvelles circulent alternativement sur une ligne de tramway, il conviendra de prendre la moyenne (géométrique), pondérée selon la proportion de rames de chaque type, des deux spectres pour les calculs de pronostics.

Les figures 1 et 2 montrent les spectres d'émission ainsi obtenus pour les rames anciennes et nouvelles, respectivement, ainsi que les spectres après application de la fonction de correction pour tenir compte de la présence d'un aiguillage ou bien d'une courbure du rail. Le tableau 1 donne les valeurs des spectres d'émission retenus pour les rames anciennes et nouvelles, ainsi que les facteurs de correction à appliquer pour tenir compte de la présence d'un aiguillage, d'une courbure du rail ou de dépôts de sol argileux.

La comparaison des spectres d'émission résultants permet de mettre en évidence le fait que :

- le franchissement des aiguillages et des courbures produit des vibrations, en dessous de 50 Hz, plus gênantes, en tant que telles, car les fréquences propres des dalles se situent souvent en dessous de 40 Hz.
- le passage des rames en ligne droite produit plus de vibrations à haute fréquence et sera donc plus gênant sous la forme de son solidien, par rapport au passage des aiguillages et des zones de courbures du rail.

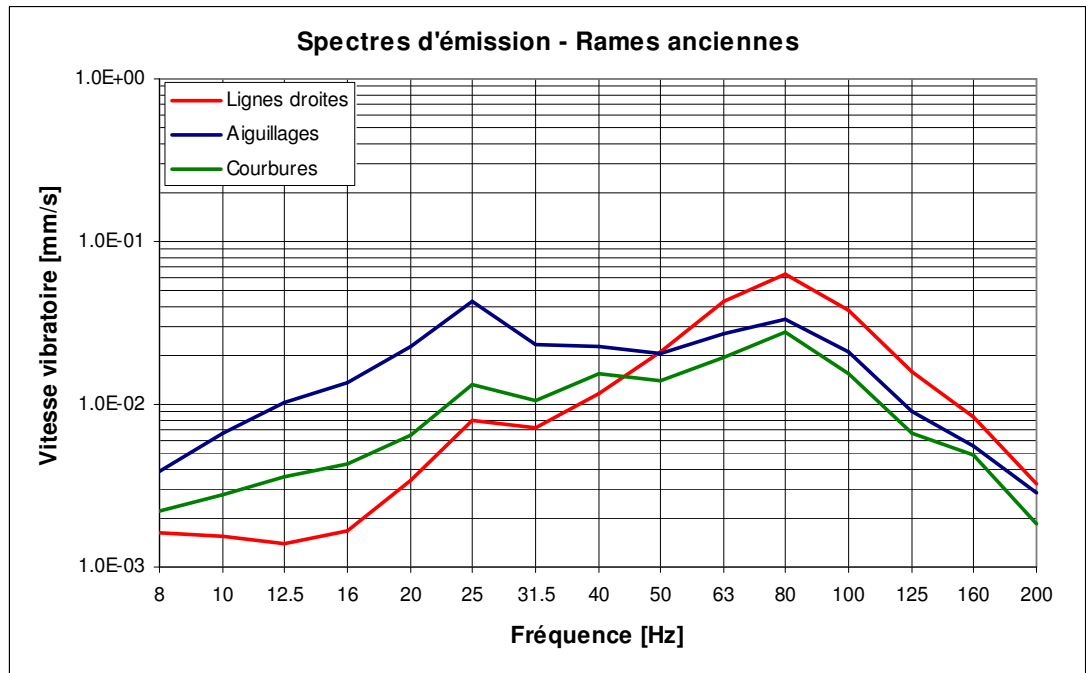


Figure 1 : Spectres d'émission pour le tram circulant en ligne droite, à 6 m de distance (en rouge), ainsi que spectre corrigé pour les aiguillages (en bleu) et les courbures du rail (en vert), pour les rames anciennes du tramway genevois.

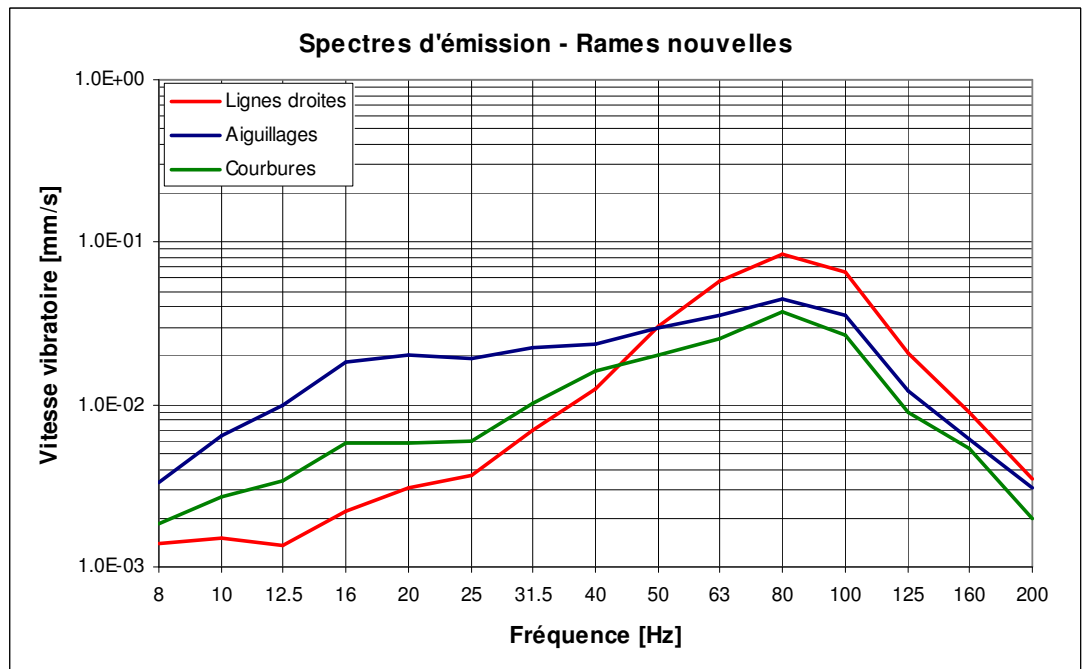


Figure 2 : Spectres d'émission pour le tram circulant en ligne droite, à 6 m de distance (en rouge), ainsi que spectre corrigé pour les aiguillages (en bleu) et les courbures du rail (en vert), pour les rames nouvelles du tramway genevois.

Directives techniques pour TRAM			section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure		6.3 / 10
Section : 6.3	MESURES ANTIVIBRATOIRES		Version : mai 2016
Article : 6.3.2	Pronostics des vibrations (suite)		

Tableau 1 : Spectres d'émission retenus pour les rames anciennes et nouvelles, et facteurs de correction à appliquer pour tenir compte de la présence d'un aiguillage, d'une courbure du rail, ou de la présence d'un sol de type argileux épais. La différence de vitesse de passage est incluse dans ces corrections.

Fréquence	Emission lignes droites		Facteurs de correction		
	Rames anciennes	Rames nouvelles	Courbure	Aiguillage	Sol argileux
[Hz]	[mm/s]	[mm/s]			
8	0.0016	0.0014	1.33	2.35	1.87
10	0.0015	0.0015	1.82	4.31	2.83
12.5	0.0014	0.0013	2.53	7.28	4.49
16	0.0017	0.0022	2.58	8.19	4.29
20	0.0034	0.0031	1.91	6.68	3.01
25	0.0080	0.0036	1.64	5.34	2.07
31.5	0.0072	0.0069	1.47	3.24	0.95
40	0.0117	0.0124	1.30	1.92	0.46
50	0.0209	0.0305	0.66	0.98	0.29
63	0.0434	0.0579	0.44	0.62	0.31
80	0.0630	0.0843	0.44	0.53	0.17
100	0.0377	0.0646	0.41	0.55	0.19
125	0.0157	0.0210	0.43	0.58	0.41
160	0.0083	0.0090	0.59	0.67	0.50
200	0.0033	0.0035	0.56	0.88	0.50

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.3 / 11
Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES		Version : mai 2016
Article : 6.3.3 Choix du type de mesures de protection		

Si les valeurs pronostiquées dépassent les seuils limites, alors des mesures de protection doivent être envisagées.

Les mesures pour réduire le niveau de bruit solidien uniquement sont plus légères et moins onéreuses que celles visant à réduire les vibrations proprement dites.

Les types de pose vont de la simple attache résiliente du rail peu coûteuse au système de la dalle flottante lourde engendrant un surcoût.

Il faut savoir que l'attache résiliente n'apporte qu'une réduction limitée du bruit solidien, alors que le système de dalle flottante permet d'atténuer les vibrations et apporte une réduction importante du bruit solidien.

Entre ces deux extrêmes, il existe des solutions intermédiaires (voir 6.3.4 à 6.3.10).

Très approximativement si la distance D entre l'axe de la voie et la façade de l'immeuble considéré est de :

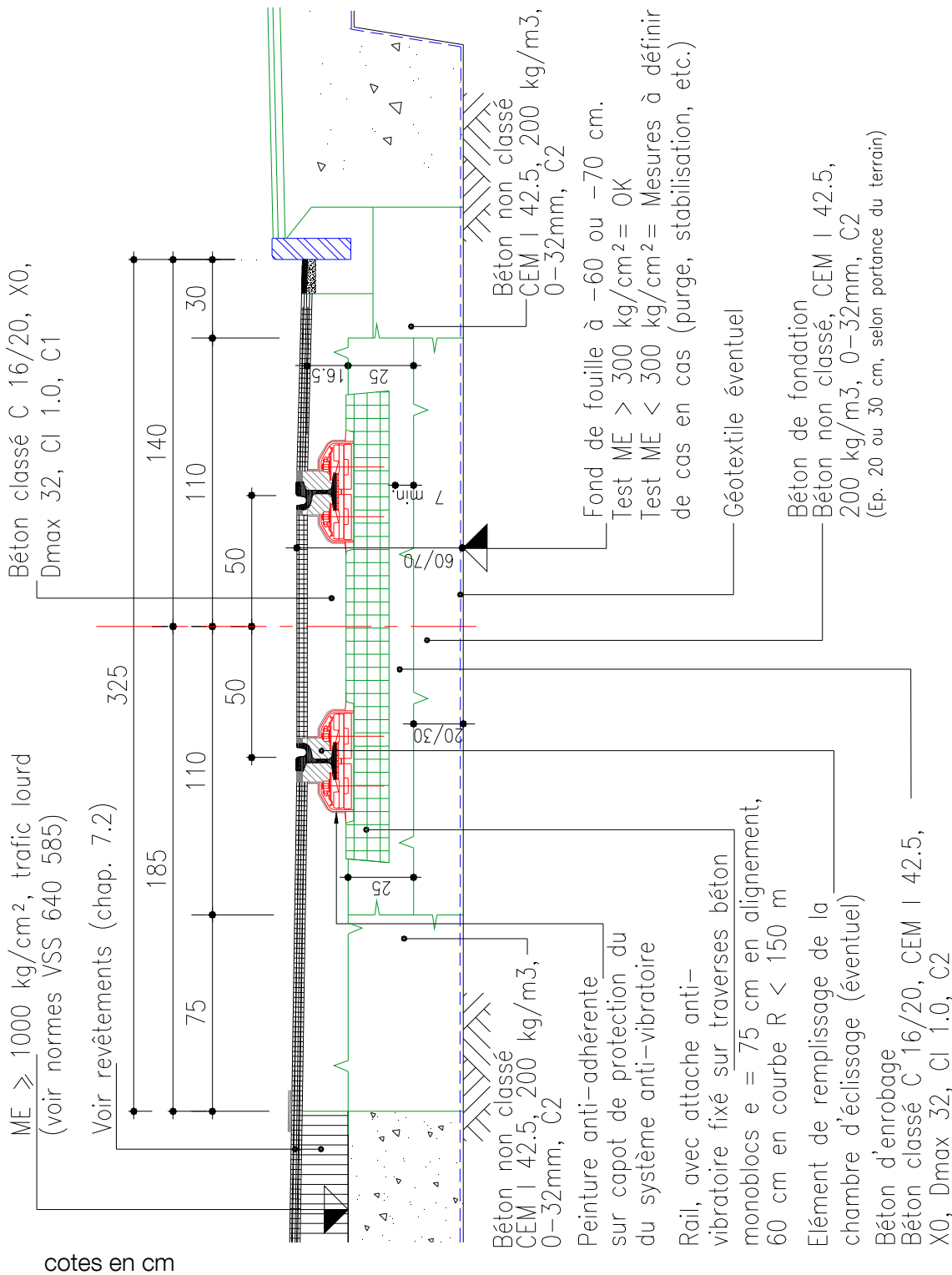
- D < 5 m des mesures de protection sont pratiquement toujours nécessaires.
- 5 m < D < 12 m des mesures de protection peuvent s'avérer nécessaires en fonction du comportement dynamique du bâtiment.
- D > 12 m en règle générale, pas de protections particulières.

L'optimisation de ces mesures en fonction des conditions particulières relève d'un spécialiste en la matière.

Remarque :

Il faut éviter toute liaison rigide (tuyaux, canalisations, massifs de béton enterrés, etc.) entre le béton d'enrobage des traverses et les immeubles riverains.

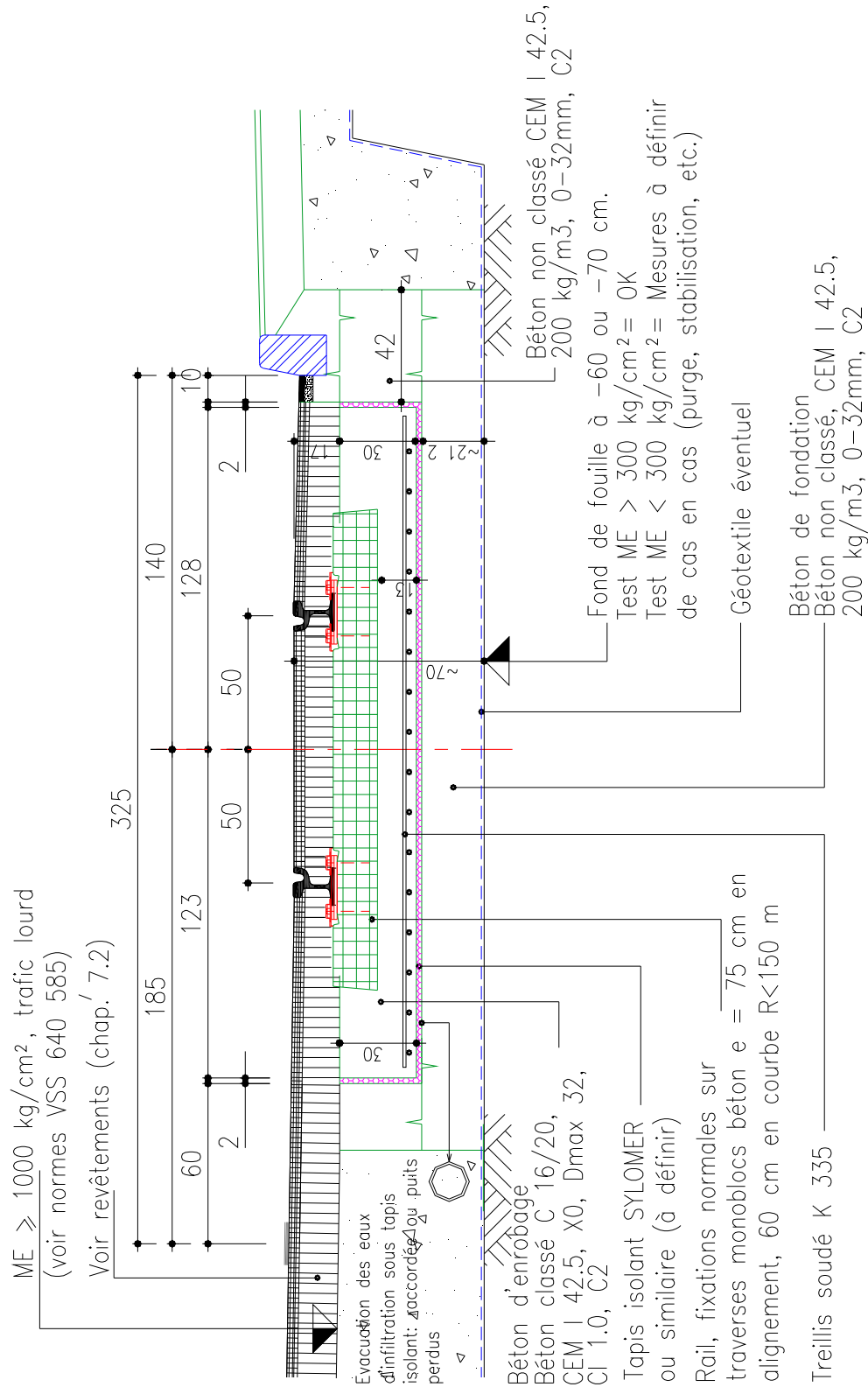
Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.3 / 12
Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES		Version : mai 2016
Article : 6.3.4 Exemple avec attaches anti-vibratoires des rails (traverses ASP)		



Remarques concernant le texte de soumission:

- Il devra être rédigé de façon à ne pas occasionner des revendications ultérieures pour mise en oeuvre à la pompe ou autre.
- Les bétons sont métrés au cube théorique (volume des traverses déduit)

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.3 / 13
Section : 6.3	MESURES ANTIVIBRATOIRES	Version : mai 2016
Article : 6.3.5	Exemple d'une dalle flottante légère sur appui surfacique (tapis résilient)	



cotes en cm

- Remarques concernant le texte de soumission:
- Il devra être rédigé de façon à ne pas occasionner des revendications ultérieures pour mise en oeuvre à la pompe ou autre.
 - Les bétons sont métrés au cube théorique (volume des traverses déduit)

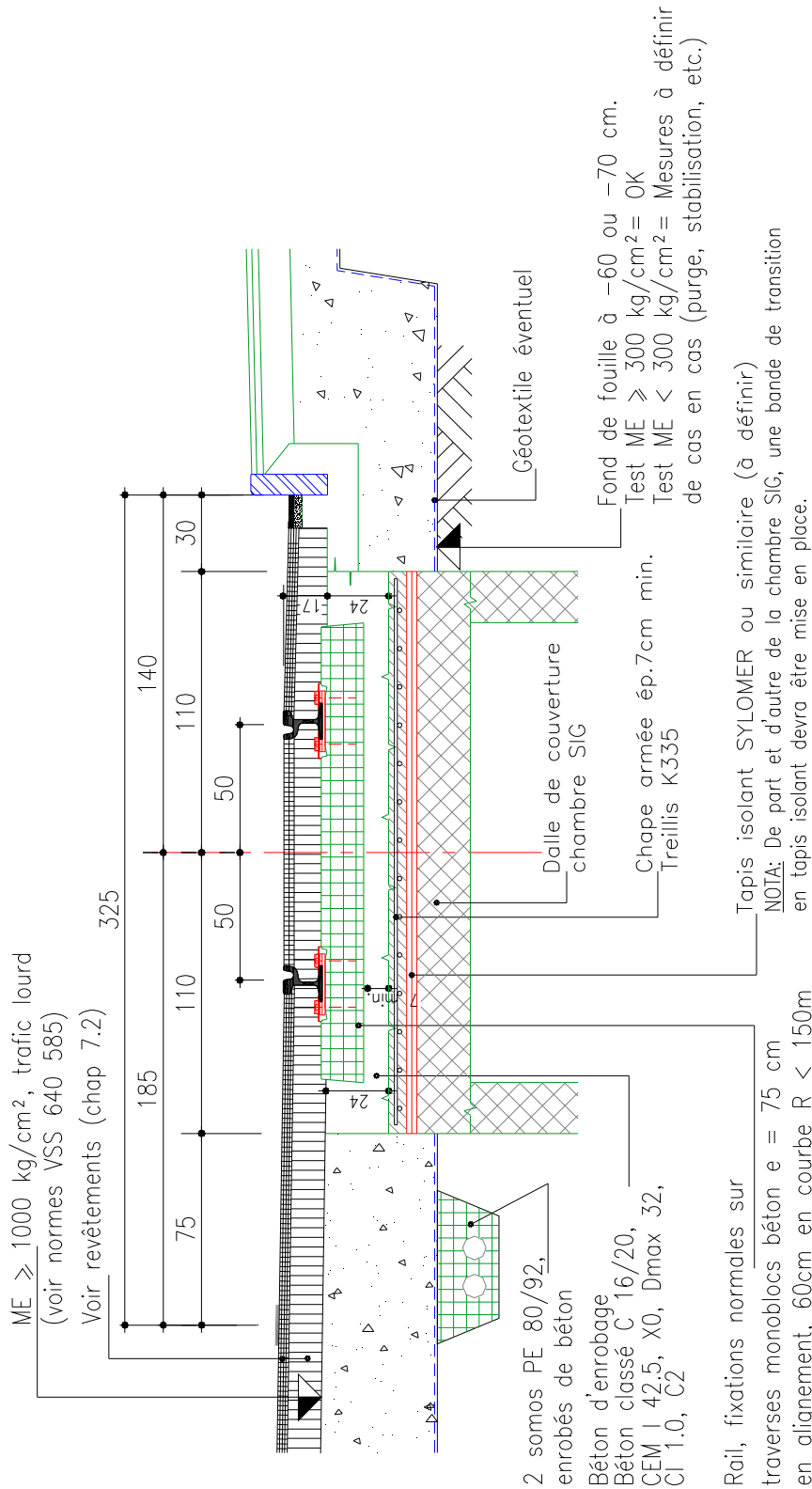
Chapitre : 6. Infrastructure

6.3 / 14

Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES

Article : **6.3.6 Exemple de franchissement d'une chambre située directement sous voie**

Version : mai 2016



cotes en cm

- Remarques concernant le texte de soumission:
- Il devra être rédigé de façon à ne pas occasionner des revendications ultérieures pour mise en oeuvre à la pompe ou autre.
 - Les bétons sont métrés au cube théorique (volume des traverses déduit)

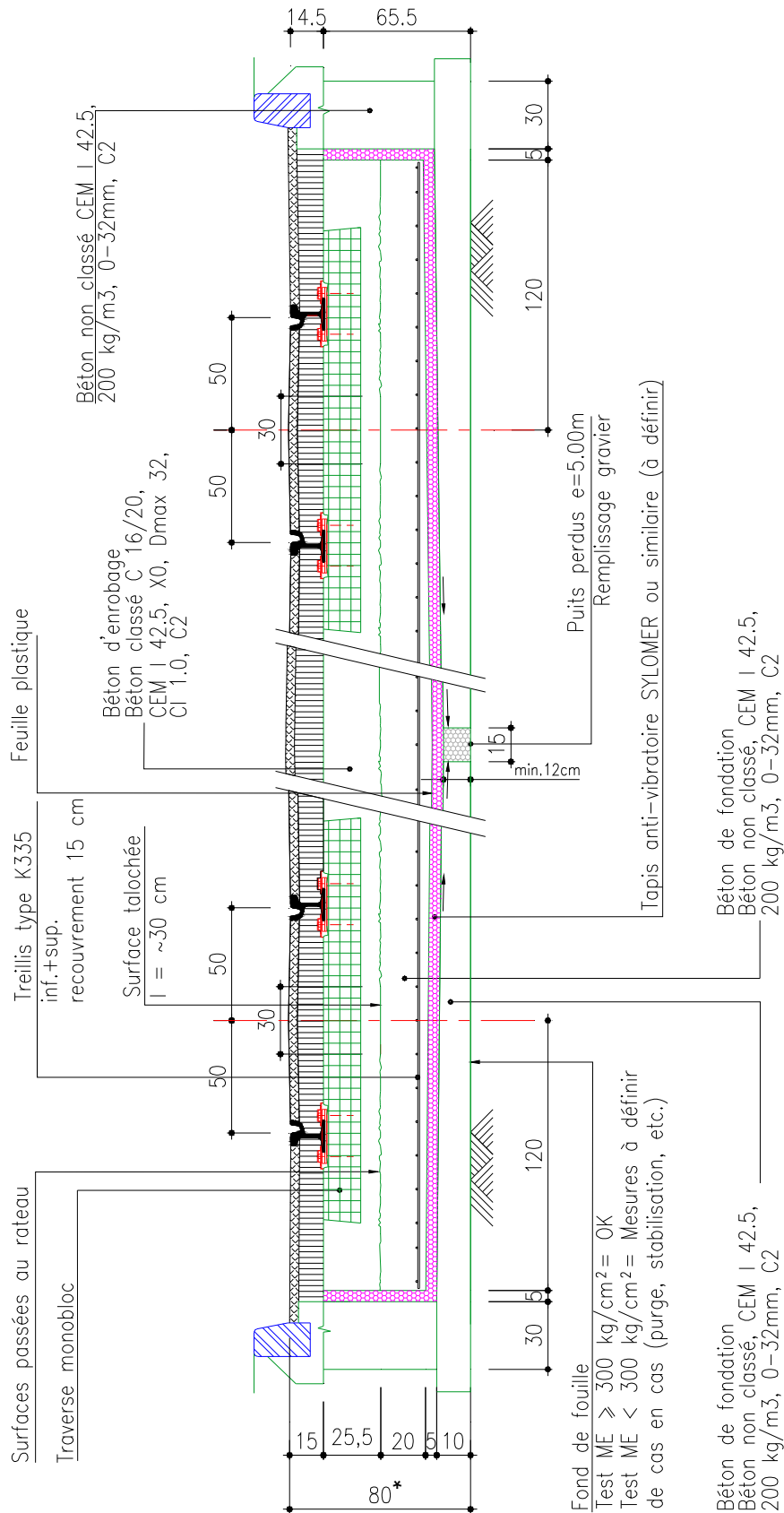
Chapitre : 6. Infrastructure

6.3 / 15

Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES

Article : 6.3.7 Exemple d'une dalle flottante légère sur appui surfacique

Version : mai 2016



cotes en cm

Remarques concernant le texte de soumission:

- Il devra être rédigé de façon à ne pas occasionner des revendications ultérieures pour mise en oeuvre à la pompe ou autre.
- Les bétons sont métrés au cube théorique (volume des traverses déduit)

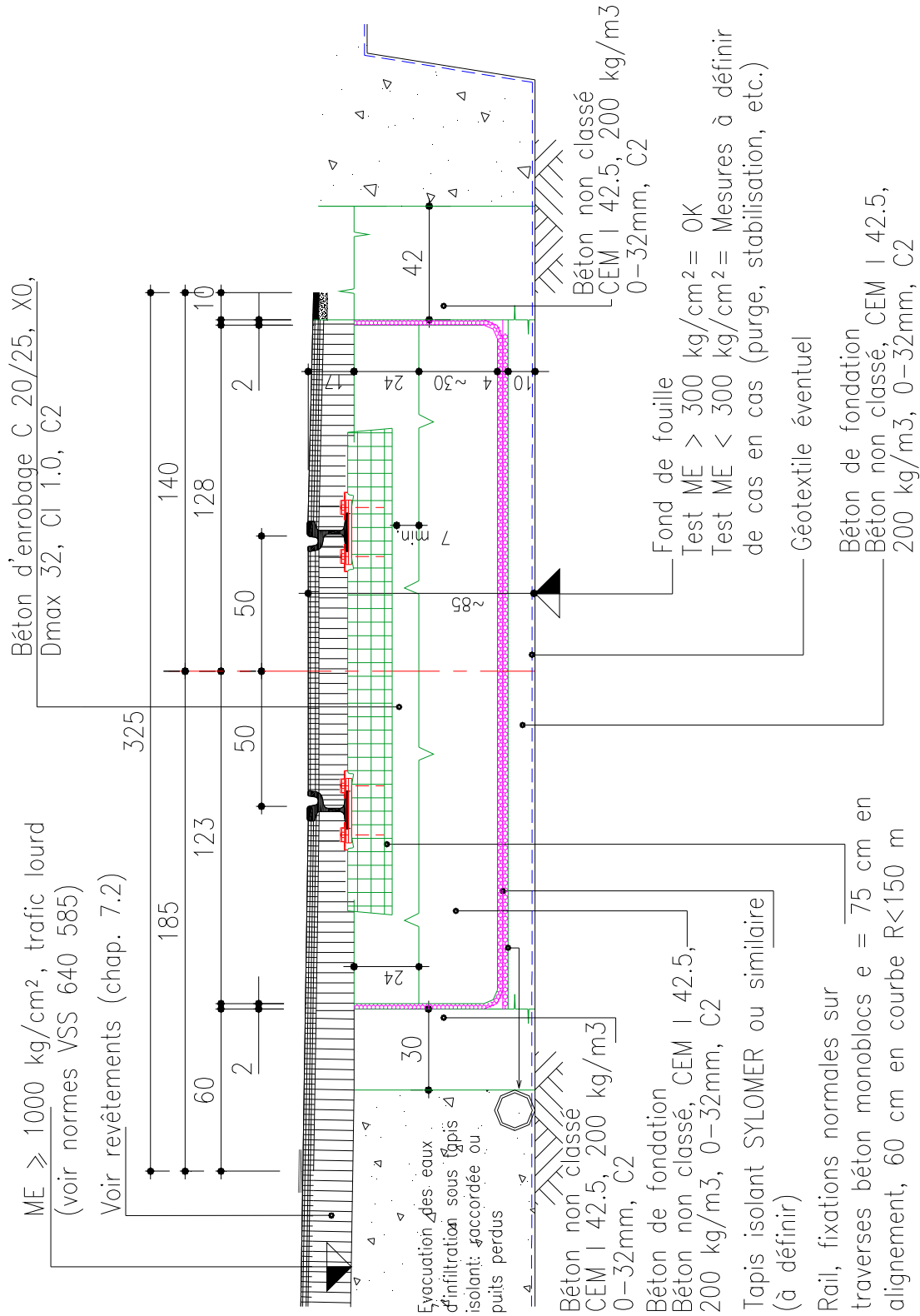
Chapitre : 6. Infrastructure

6.3 / 16

Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES

Article : **6.3.8 Exemple d'une dalle flottante intermédiaire sur appui surfacique (tapis résilient)**

Version : mai 2016



cotes en cm

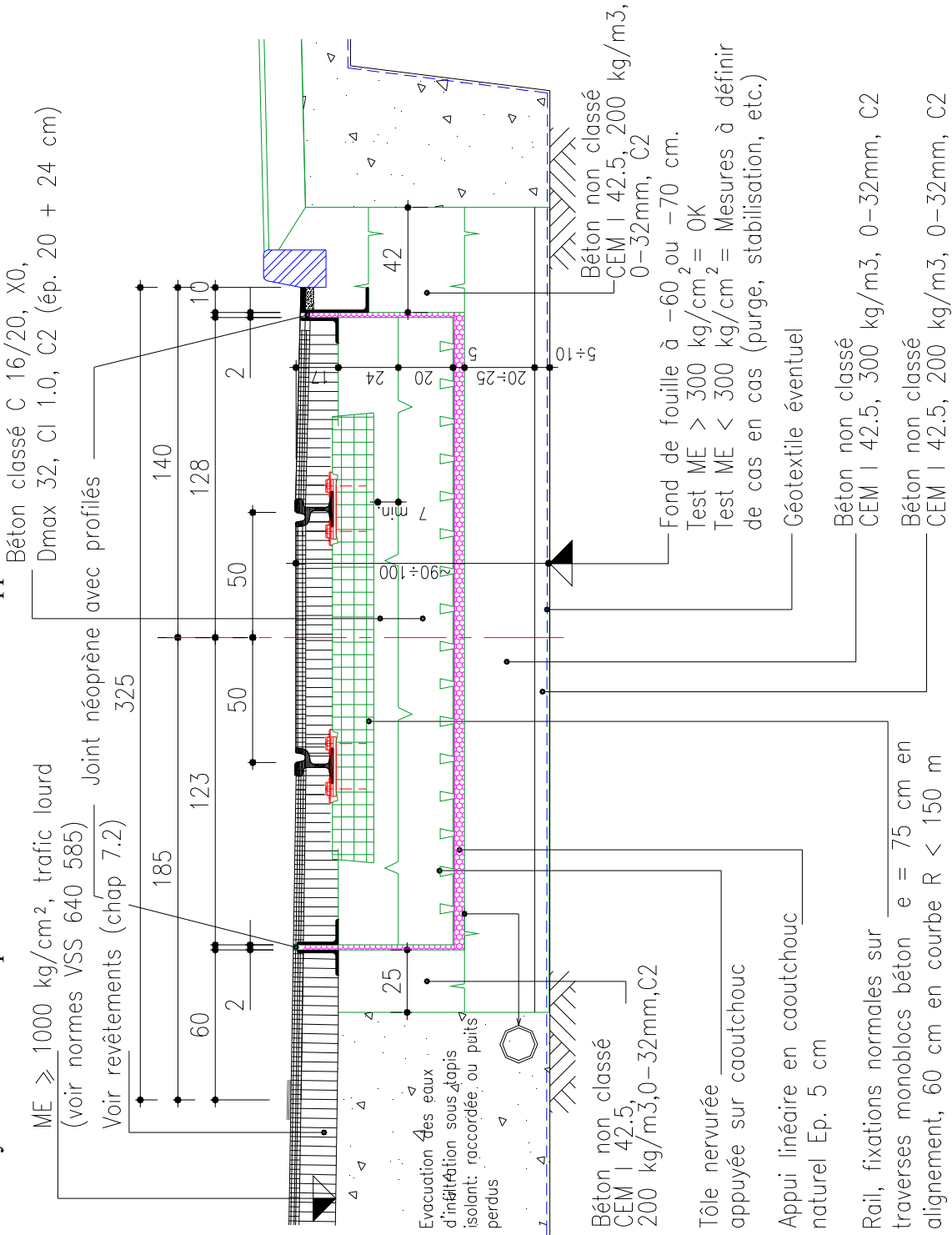
Remarques concernant le texte de soumission:

- Il devra être rédigé de façon à ne pas occasionner des revendications ultérieures pour mise en oeuvre à la pompe ou autre.

- Les bétons sont métrés au cube théorique (volume des traverses déduit)

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6.	Infrastructure	6.3 / 17
Section : 6.3	MESURES ANTIVIBRATOIRES	Version : mai 2016
Article : 6.3.9	Exemple d'une dalle flottante lourde sur appuis linéaires	

Ce système est techniquement le meilleur réalisable. Il apporte une réduction du son solide de 20 à 30 dB.



cotes en cm

Remarques concernant le texte de soumission:

- Il devra être rédigé de façon à ne pas occasionner des revendications ultérieures pour mise en oeuvre à la pompe ou autre.
- Les bétons sont métrés au cube théorique (volume des traverses déduit)

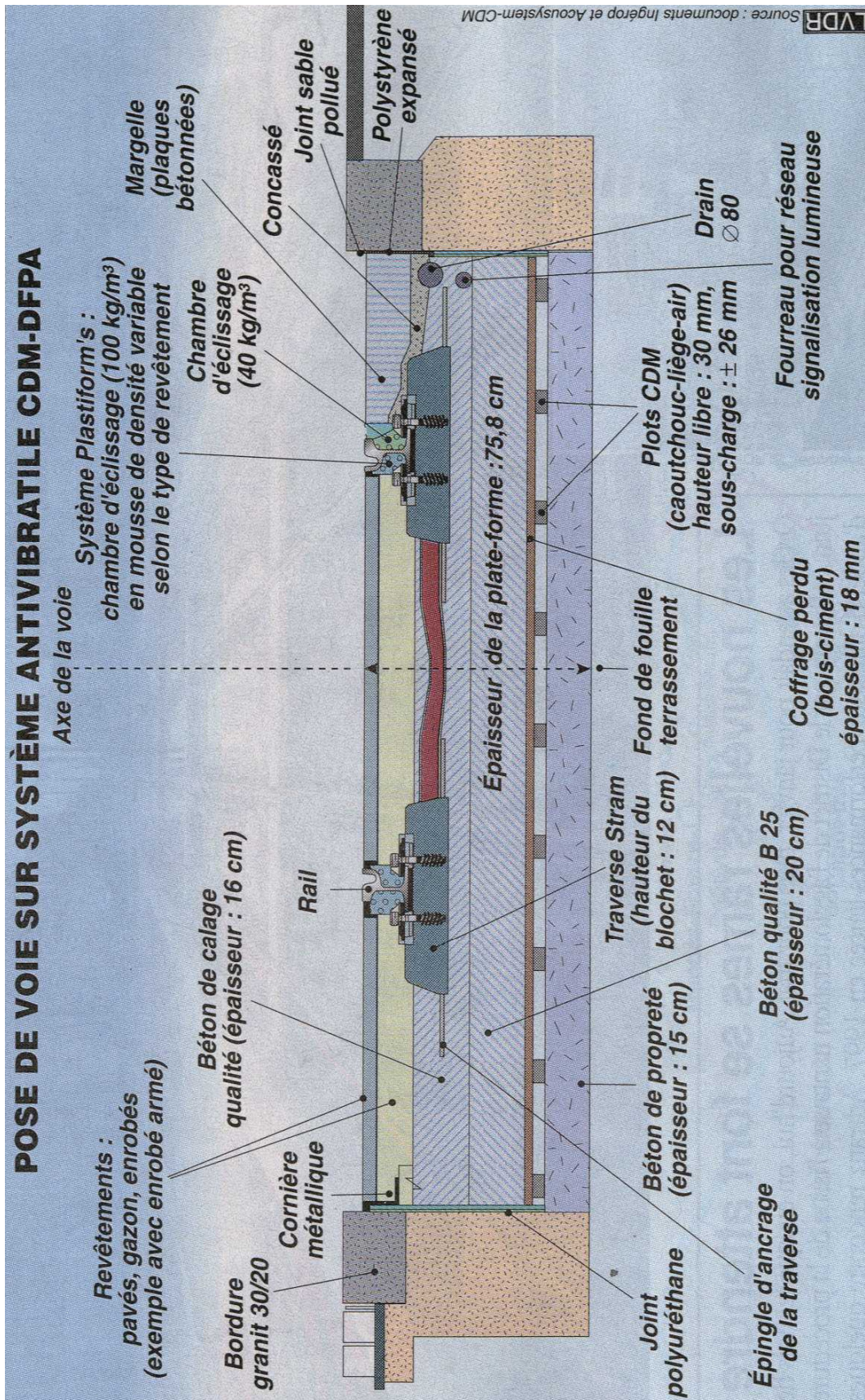
Chapitre : 6. Infrastructure

6.3 / 18

Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES

Article : 6.3.10 Exemple d'une dalle flottante
d'inertie en béton sur plots résilients

Version : mai 2016



Remarque: voir p. 6.2 / 1 pour traverses bi-blocs

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.3 / 19
Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES		Version : mai 2016
Article : 6.3.11 Pose anti-vibratile niveau 1 : amortissement vibratoire - 10 dBv		

Il existe des produits ou techniques similaires à celles présentées ci-avant qui ont obtenu de bons résultats d'amortissement :

- Pose DS iso rail : remplacement des semelles cannelées par des semelles anti-vibratiles de raideur alternée.
- Pose Dephi : remplacement des semelles cannelées par des semelles anti-vibratiles de raideur unique.
- Pose Edilon : rail noyé dans un matériau anti-vibratile (polyuréthane).
- Pose sur traverses STEDEF : un chausson caoutchouc et une semelle anti-vibratile sont disposés autour et sous chaque blochet. Cette pose est principalement retenue sur les ouvrages d'art et les tunnels. Elle peut être combinée avec un revêtement dalle préfabriquées en site protégé. SATEBA, fabricant de ces traverses, à amélioré le système en créant une étanchéité autour des chaussons.

Afin de garantir le bon fonctionnement de ces divers systèmes, le rail sera ensuite habillé de chambre d'éclissage en caoutchouc recyclé ou en mousse de polyéthylène réticulé physiquement, le système d'attaches élastiques sera protégé par capots plastiques ou polypropylène afin de permettre une déflexion verticale dynamique de celui-ci. La déflexion est limitée au millimètre tant dans le sens vertical que transversal.

Matériaux anti-vibratiles

Les caractéristiques des matériaux anti-vibratiles doivent être données par les entreprises lors de la consultation afin que le Maître d'œuvre donne son agrément.

L'entrepreneur et/ou son fournisseur fourniront une garantie de 10 ans, à partir de la mise en service, sur l'efficacité des matériaux mis en œuvre.

Des points de mesure pourront être positionnés le long du tracé afin de vérifier pendant les dix années à venir l'efficacité des systèmes.

Directives techniques pour TRAM		section n° / page n°
Chapitre : 6. Infrastructure		6.3 / 20
Section : 6.3 MESURES ANTIVIBRATOIRES		Version : mai 2016
Article : 6.3.11 Pose anti-vibratile niveau 1 : amortissement vibratoire - 10 dBv (suite)		

Les caractéristiques principales des différents matériaux à renseigner sont données dans le tableau suivant :

PRESCRIPTION	UNITES	
Matériau constituant		
Epaisseur	cm	
Type		
Masse volumique	kg/m ³	
Dureté shore	°A	
Résistance à la traction	MPa	
Allongement à la rupture	%	
Compression set	%	
Absorption d'eau	g/cm ³	
Module d'élasticité E _{stat}	MPa	
Module d'élasticité E _{dyn}	MPa	
Module de cisaillement G _{stat}	MPa	
Module de cisaillement G _{dyn}	MPa	
Résistivité	Ωcm	

Le comportement des matériaux par rapport à son amortissement doit être identique à l'état sec ou humide.