

**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 1-1** : Formulation des hypothèses de dimensionnement  
Version 1.00

---

Document établi par :  
J.-M. Balay (LCPC)  
P. Cochet (LREP)  
L. Grin (LROP)

## SOMMAIRE

I-	DEMARCHE DE DIMENSIONNEMENT PROPOSEE .....	3
I-1	Base et description du modèle rationnel routier LCPC-SETRA .....	3
I-1.1	Généralités sur la méthode de dimensionnement.....	3
	Le trafic .....	4
	L'environnement – les données climatiques.....	4
	La plate-forme support .....	5
	Les matériaux de chaussée .....	5
	La qualité de la réalisation des travaux de construction.....	5
I-1.2	Calcul mécanique des sollicitations créées par le trafic.....	5
	Les matériaux bitumineux.....	6
	Le béton de ciment.....	6
I-1.3	Vérification au gel/dégel.....	7
I-2	Adaptations nécessaires pour l'étude tramway sur pneus.....	7
I-2.1	Modèle de calcul de la structure .....	8
	Prise en compte de la longrine.....	8
	Prise en compte des effets de bords .....	8
I-2.2	Performances des matériaux .....	8
I-2.3	Trafic.....	8
	Calcul de l'agressivité du trafic tramway.....	8
	Absence de balayage ou canalisation totale .....	8
	Prise en compte des croisements .....	9
II-	DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES BETON .....	9
II-1	Avis sur les options b1 et b2 du cahier des charges .....	9
II-2	Mode de réalisation de la plate-forme – interrogation Q2.....	10
	II-2.1 Considérations relatives aux conditions de réalisation des chaussées en béton.....	10
	II-2.2 Propositions techniques.....	11
II-3	Caractéristiques mécaniques des matériaux.....	12
	II-3-1 Matériaux pour assises.....	12
	II-3-2 Types de structures de chaussées .....	13
	II-3-3 Sols supports : conditions envisagées.....	13
II-4	Caractérisation du trafic Tramway vis à vis des structures béton.....	14
	II-4-1 Prise en compte de l'histogramme des charges à l'essieu .....	14
	II-4-2 Prise en compte de canalisation totale de la circulation .....	15
	II-4-3 Prise en compte des effets de croisement.....	15
II-5	Evaluation des effets de bord.....	16
III-	DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES BITUMINEUSES.....	17
III-1	Avis sur les options a1 et a2 du cahier des charges .....	17
III-2	Hypothèses pour le dimensionnement de la longrine – question Q1 .....	18
III-3	Caractéristiques mécaniques des matériaux.....	19
	III-3.1 Matériaux pour assises.....	19
	III-3.2 Types de structures de chaussées : .....	19
	III-3.3 Sols supports .....	20
III-4	Caractérisation du trafic Tramway vis à vis des structures bitumineuses.....	21
III-5	Evaluation de l'effet longrine et des effets de bords.....	21

La RATP a confié en décembre 2003 au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, pilote de l'étude) et aux Laboratoires Régionaux de l'Est et de l'Ouest Parisien (Le Bourget et Trappes), une étude qualifiée de générique, visant à :

- définir une démarche pour le dimensionnement de structures de chaussées pour les futurs projets de Tramways sur pneus de la région parisienne,
- et réaliser divers dimensionnements types de chaussées bitumineuses ou rigides, pour ce nouveau système de transport en commun.

Ce document prévu au contrat, constitue le premier rapport d'étude établi par le LCPC, le LREP et le LROP. Il rassemble l'ensemble des hypothèses proposées à la RATP pour la réalisation des études de dimensionnement qui suivront.

## **I- DEMARCHE DE DIMENSIONNEMENT PROPOSEE**

Le dimensionnement des structures de chaussées routières et autoroutières du réseau routier national s'effectue en France selon la méthode rationnelle LCPC-SETRA. L'ensemble des hypothèses et des modalités de mise œuvre de la méthode rationnelle est décrit dans le Guide technique Conception et dimensionnement des chaussées (LCPC-SETRA, décembre 1994). La méthode rationnelle est également d'utilisation courante pour le dimensionnement d'autres types de chaussées comme celles relevant des régions, des départements ou des communes. Pour le dimensionnement des structures de chaussées pour tramways sur pneus objet de la présente étude générique, nous proposons d'utiliser cette méthode générale de dimensionnement, moyennant diverses adaptations qui seront décrites plus bas.

### **I-1 Base et description du modèle rationnel routier LCPC-SETRA**

La méthode rationnelle relève d'une démarche combinant les apports de la mécanique rationnelle et des éléments expérimentaux :

- les méthodes de la mécanique sont employées pour simuler numériquement la structure de chaussée et calculer les sollicitations créées dans les différentes couches de matériaux par une charge standard de référence, correspondant à l'essieu légal français ;
- les résultats d'essais en laboratoire sur l'endommagement sous chargements répétés des matériaux de chaussées sont utilisés pour apprécier leur résistance vis-à-vis de la fatigue, moyennant d'un modèle de fatigue (modèle de Wöhler) et un principe d'additivité des dommages (principe de Miner) ;
- les enseignements résultant de l'observation du comportement de chaussées réelles interviennent enfin pour préciser le critère de vérification vis-à-vis des déformations permanentes du sol support et des couches non liées et pour caler les résultats du modèle de calcul.

#### I-1.1 Généralités sur la méthode de dimensionnement

La méthode de dimensionnement prend en compte les facteurs suivants :

- le trafic,
- l'environnement (données climatiques),
- la plate-forme support de chaussée,
- les matériaux de chaussée,
- la qualité de la réalisation de la chaussée,
- l'exigence de niveau de service fixée par la maîtrise d'ouvrage, qui est directement traduite dans le dimensionnement par une valeur de risque de rupture à l'issue de la durée de service de la chaussée.

### *Le trafic*

Les chaussées sont dimensionnées vis-à-vis du trafic poids lourds. Il est exprimé en terme de trafic poids lourd cumulé sur toute la durée de service de la chaussée (TC), qui est calculé par la formule suivante :



- MJA : nombre journalier de poids lourds par sens de circulation sur la voie la plus chargée à la mise en service (moyenne journalière annuelle),  
 t : taux annuel de croissance linéaire du trafic,  
 d : durée de vie, en années.

Ce trafic poids lourds est constitué de combinaisons variables de véhicules ayant des charges à l'essieu et des configurations d'essieux différentes. La méthode de calcul implique la conversion de ce trafic composite, en un nombre cumulé d'essieux de référence, NE, équivalent au trafic cumulé TC en terme d'endommagement de la chaussée. En France, l'essieu de référence est l'essieu isolé à roues jumelées de poids total 130 kN (32.5 kN par roue). Le coefficient d'agressivité moyenne du trafic (CAM) permet d'effectuer cette conversion :

$$NE = TC \times CAM$$

L'agressivité des essieux ne s'exprime pas par une relation unique, les valeurs du coefficient d'agressivité dépendent, outre la consistance du trafic, du matériau et de la structure de chaussée. Sur le réseau national, les valeurs du coefficient CAM résultent d'études d'analyses du trafic routier mise à jour périodiquement, et correspondent à des valeurs moyennes nationales.

### *L'environnement – les données climatiques*

La température influence le comportement des différents types de chaussées :

- par son influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux, en raison de leur comportement thermo-visco-élastique,
- par les variations d'ouverture des fissures dans les matériaux traités aux liants hydrauliques, qui accompagnent les variations cycliques de température,
- par les déformations de dalles dues aux gradients thermiques dans les chaussées rigides.

Pour les matériaux bitumineux, les calculs sont faits en considérant une température du matériau de chaussée constante, appelée température équivalente. En France métropolitaine, la température équivalente utilisée pour les dimensionnement courant est de 15°C, valeur résultant d'histogrammes types de distributions annuelles des températures dans les chaussées bitumineuses.

La structure de chaussée qui résulte du dimensionnement mécanique fait également l'objet de vérification au gel-dégel. En présence de sols sensibles au gel, cette vérification vise à s'assurer que le maintien du trafic poids lourd pendant les périodes de dégel ne se traduira pas par une dégradation accélérée de la chaussée.

#### *La plate-forme support*

Le Guide technique Réalisation des remblais et des couches de forme (LCPC-SETRA Septembre 1992) caractérise les sols supports, le choix des matériaux utilisables pour la couche de forme et leurs conditions de mise en œuvre. Pour le dimensionnement de la structure de chaussée, le sol support est décrit par une valeur de module d'Young et du coefficient de poisson.

#### *Les matériaux de chaussée*

Un ensemble de normes codifie les différentes familles de matériaux de chaussée, définissant pour chacune d'elles des classes selon la qualité des constituants et certaines propriétés physiques et mécaniques des mélanges. Pour les matériaux normalisés, les valeurs de résistance mécanique et de déformabilité retenues sont déduites des valeurs moyennes obtenues sur la formule de base, établie conformément aux dispositions des normes définissant les méthodologies d'étude. La détermination des sollicitations admissibles vis à vis de la fatigue par les matériaux prend en compte la dispersion qui caractérise les résultats des essais de fatigue en laboratoire.

#### *La qualité de la réalisation des travaux de construction*

La méthode de dimensionnement s'applique à des situations pour lesquelles les prescriptions et les règles de l'art concernant la fabrication et la mise en œuvre des matériaux sont totalement respectées. Elle permet d'intégrer cependant des écarts entre les épaisseurs nominales des couches de matériaux et les épaisseurs réellement mises en œuvre. Ceci s'effectue à partir d'hypothèses sur les dispersions d'épaisseur, issues des observations sur chaussées.

### I-1.2 Calcul mécanique des sollicitations créées par le trafic

Nous considéreront tout particulièrement dans ce paragraphe, les matériaux de chaussées envisagés pour la réalisation des plates-formes de tramways sur pneus. Le dimensionnement routier consistera à déterminer :

- d'une part, les sollicitations créées par le trafic dans les différentes couches de matériaux. Cette évaluation repose sur un modèle théorique dans lequel la chaussée est assimilée à un massif multi-couche semi-infini, en adoptant pour les matériaux un comportement linéaire-élastique et isotrope. Les calculs s'effectuent en pratique à l'aide de logiciels spécifiques dédiés à ce type de modélisation, tel que le logiciel Alizé du LCPC.
- d'autre part, les sollicitations admissibles par les matériaux constituant la chaussée, vis à vis de l'endommagement par fatigue. La détermination des valeurs admissibles repose sur les résultats d'essais de fatigue normalisés réalisés en laboratoire.

### *Les matériaux bitumineux*

Ces matériaux sont définis dans les normes AFNOR de la série NF P 98-130 à 150. Chaque norme de produit traite de la définition, de la classification, des caractéristiques et des particularités de fabrication et de mise en œuvre.

La définition des spécifications sur les performances s'appuie sur une gamme parfaitement définie d'essais de laboratoire, dont en particulier la presse à cisaillement giratoire, l'essai d'orniérage et les essais de module et de fatigue. La caractérisation mécanique porte sur :

- la susceptibilité du module d'Young vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement. Cette susceptibilité est évaluée par les essais de module et de perte de linéarité ou de flexion dynamique ;
- le comportement en fatigue.

Le comportement en fatigue est apprécié par l'essai de fatigue en flexion pratiqué à la température de 10°C et la fréquence de 25 Hz. La courbe de fatigue du matériau exprime la relation entre la déformation de traction par flexion  $\varepsilon$  supportée par l'échantillon, et le nombre de chargements N, pour lequel sa rupture par fatigue est observée. Cette courbe de fatigue est représentée par une relation de la forme ci-dessous, correspondant à une droite dans le repère bi-logarithmique (modèle de fatigue de Wöhler) :



avec :

- $b$  : pente de la droite de fatigue,
- $\varepsilon_6$  : déformation de traction par flexion pour laquelle la rupture est obtenue sous 1 million d'applications du chargement, dans les conditions 10°C, 25Hz.

Les résultats des essais de fatigue sur les matériaux granulaires liés se caractérisent par la forte dispersion des résultats, qui est décrite par l'écart type  $\delta N$  sur le logarithme de N.

Pour le dimensionnement, la détermination des sollicitations admissibles par les matériaux découle directement de la courbe de fatigue obtenue en laboratoire, pondérée par divers coefficients permettant de prendre en compte les facteurs tels que la température de la chaussée en service, le risque de rupture admis à l'issue de la durée de service, etc... L'expression des déformations admissibles est la suivante :

$$\varepsilon_{\text{tad}} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) \times \left( \frac{NE}{10^6} \right)^b \times k_\theta \times k_c \times k_r \times k_s$$

où  $k_\theta$ ,  $k_c$ ,  $k_r$  et  $k_s$  sont des coefficients pondérateurs qui seront explicités en II-5 et III-5.

### *Le béton de ciment*

Les spécifications du béton sont définies par la norme NF P 98-170. En termes de performances mécaniques, les bétons sont classés suivant la valeur caractéristique de la résistance mécanique à 28 jours, déterminée par l'essai de fendage ou par l'essai de compression.

Les paramètres de comportement mécanique nécessaires au dimensionnement des structures de chaussées en béton de ciment sont :

- $E$  : module d'Young,

- $\sigma_6$  : contrainte de rupture en traction par flexion à  $10^6$  cycles,
- $b$  : pente de la droite de fatigue
- $\delta N$  : écart type sur la loi de fatigue.

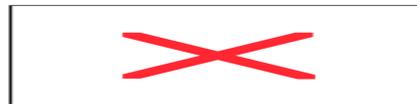
La courbe de fatigue est également une droite dans le repère bi-logarithmique, avec pour expression :

$$\sigma = \sigma_6 \times \left( \frac{N}{10^6} \right)^b$$

$\sigma_6$  peut être déduit d'essais de résistance en fendage (compression diamétrale),  $f_t$ , par la formule :

$$\sigma_6 = 0.65 \times f_t$$

La contrainte admissible de dimensionnement est donnée par la formule :



où  $k_\theta$ ,  $k_c$ ,  $k_r$  et  $k_d$  sont les coefficients pondérateurs.

### I-1.3 Vérification au gel/dégel

La vérification au gel/dégel consiste à comparer :

- l'indice de gel atmosphérique choisi comme référence, IR. Il caractérise la rigueur de l'hiver dont on souhaite protéger la chaussée, fonction de la localisation géographique du projet,
- et l'indice de gel atmosphérique que peut supporter la chaussée, appelé indice de gel admissible IA. Cet indice s'évalue en fonction de la sensibilité au gel du sol support, de la protection thermique et du rôle mécanique du corps de chaussée.

Selon l'importance attachée à la continuité du service de la route :

- on conçoit la structure de chaussée pour que l'indice de gel admissible IA de la chaussée soit supérieur à l'indice de gel de référence IR,
- ou l'on accepte que l'inégalité  $IA > IR$  ne soit pas assurée. Dans ce cas, on pourra être conduit à la pose de barrières de dégel pour préserver la chaussée lors du dégel.

## **I-2 Adaptations nécessaires pour l'étude tramway sur pneus**

La démarche du dimensionnement rationnelle appliquée au cas des plate-formes de tramways sur pneus nécessitent diverses adaptations, qui seront simplement listées dans cette partie. Elles concernent le calcul de structure, les performances des matériaux et le données trafic. Chacune de ces adaptations sera détaillée dans les parties II et III.

## I-2.1 Modèle de calcul de la structure

### *Prise en compte de la longrine*

Dans les chaussées bitumineuses, la présence de la longrine béton support du rail de guidage sera prise en compte. Les conditions de liaison longrine/chaussée devront être précisées.

### *Prise en compte des effets de bords*

Ce point concerne principalement les chaussées béton, en relation avec la réponse à la question Q2 relative au mode de réalisation de la plate-forme : réalisation en une dalle unique ou deux dalles indépendantes (cf. Cahier des charges de l'étude).

## I-2.2 Performances des matériaux

Le choix d'une classe de performances réduites Q2 permettra de tenir compte des conditions particulières de réalisation de chantier en milieu urbain, comme cela est décrit dans le guide Dimensionnement des structures des chaussées urbaines (CERTU, 2000).

Par ailleurs, pour les matériaux bitumineux, les valeurs des modules d'Young tiendront compte de la vitesse de circulation en milieu urbain, réduite par rapport aux vitesses sur routes ou autoroutes. Ceci sera réalisé en adoptant pour le choix des modules, une fréquence plus faible que celle de 10 Hz qui est utilisée pour les dimensionnements courants.

## I-2.3 Trafic

### *Calcul de l'agressivité du trafic tramway*

Connaissant l'histogramme de charges par type d'essieu pour un trafic donné, son agressivité est donnée par le coefficient CAM :

$$CAM = \frac{1}{NPL} \times \left[ \sum_I \sum_J K_j n_{ij} \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \right]$$

avec :

NPL : nombre de poids lourds

K : coefficient caractéristique du type d'essieu (simple, tandem, tridem, ...)

$n_{ij}$  : nombre d'essieux élémentaires de type j et de classe de charge  $P_i$ .

### *Absence de balayage ou canalisation totale*

L'une des caractéristiques de la circulation des tramways sur pneus est la canalisation totale de la circulation, se traduisant par une majoration de son agressivité. Cet effet sera pris en compte par un coefficient d'agressivité additionnelle.

Son calcul repose sur le calcul, à l'aide du modèle mécanique, du profil en travers des sollicitations supportées par le matériau, et sur la donnée de l'histogramme de balayage latéral standard du trafic. Le calcul du coefficient d'agressivité additionnelle CAC s'effectue en appliquant le principe d'additivité des dommages (principe de Miner), son expression est la suivante :

$$CAC = \sum_I p_i \times \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \right)^{\frac{1}{b}}$$

avec :

- i : indice d'une série finie décrivant l'excentrement latéral de la charge par rapport à l'axe longitudinal moyen de circulation,
- $\sigma_i$  : sollicitation dans le matériau, correspondant à l'excentrement d'indice i de la charge,
- $p_i$  : pourcentage du trafic appliqué avec l'excentrement d'indice i.

#### *Prise en compte des croisements*

Le dimensionnement de la structure de chaussée dans les zones de carrefour devra tenir compte du trafic routier traversant, dont les effets s'additionnent à ceux des tramways sur pneus.

Deux situations de dimensionnement seront donc examinées :

- sections courantes en alignement droit ou en courbe, et zones de station ;
- zones de carrefour, en prenant les effets cumulés de la circulation tramways, et d'une circulation transversale par un trafic routier donné.

Dans les parties en courbe de la voie ou dans les zones d'accélération ou de freinage, la chaussée supporte des sollicitations de nature tangentielle, additionnelles à celles supportées en situation courante (alignement droit et vitesse constante). Comme cela est le cas pour le dimensionnement des structures routières, et notamment des chaussées urbaines, nous considérerons que les effets de ces efforts additionnels se limitent à la couche superficielle de roulement, et qu'ils sont sans influence sur le dimensionnement structurel de la chaussée (couche de base et couche de fondation), en raison de la forte diffusion des contraintes tangentielles dans l'épaisseur de la structure. Dans ces zones particulières, une attention particulière devra donc porter sur le choix de la couche de roulement pour les structures bitumineuses (principalement vis à vis des risques d'arrachement et d'orniérage). Par contre, le revêtement en béton ne devrait pas nécessiter de dispositions particulières.

## **II- DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES BETON**

### **II-1 Avis sur les options b1 et b2 du cahier des charges**

L'option b1 - BAC correspond à la technique des chaussées en Béton Armé Continu, sans joints transversaux de retrait grâce à la présence d'armatures métalliques longitudinales disposées en fibre neutre de la dalle.

L'option b2 - béton goujonné correspond à la technique des chaussées à dalles courtes non armées, dont les joints transversaux tous les 4 à 5 mètres comportent des goujons en acier lisse.

Deux considérations nous conduisent à ne pas recommander l'option b2 :

- une tendance à la formation de petites cassures d'angles ou de fissures obliques en coin de dalles est constatée fréquemment sur les chaussées béton en dalles (goujonnées ou non). Ce défaut est en général mineur sur des chaussées routières, qui

comportent une surlargeur de dalle destinée à éloigner les charges du bord de dalle (distance de l'ordre de 1.20m à 1.50m) ; le risque serait plus élevé dans le cas des plate-formes tramways où les pneus sont proches du bord de dalle (distance égale à 0.51m).

- les dalles sont animées au gré des saisons de mouvements de dilatation-retrait, qui se traduisent par des cycles d'ouverture-fermeture des différents joints transversaux, distants de 4 à 5 mètres. Ces mouvements longitudinaux nous paraissent incompatibles avec la présence d'un rail de guidage axial, fixé par scellement par coulage continu d'une résine, comme cela est spécifié par le cahier des charges.

## **II-2 Mode de réalisation de la plate-forme – interrogation Q2**

Cette interrogation porte sur la conception du profil en travers de la plate-forme:

- peut-on adopter une dalle béton unique,
- ou deux dalles indépendantes supportant chacune l'une des 2 voies du tramway ?

### II-2.1 Considérations relatives aux conditions de réalisation des chaussées en béton

La figure 1 reproduit la coupe transversale de la plate-forme selon les indications fournies par le Cahier des charges, en situation de poteaux axiaux et en situation de poteaux non axiaux.

- Il est techniquement possible de mettre en place en une seule passe de grande largeur une plate-forme de largeur 5.86m (poteaux axiaux), ou 5.46m (poteaux non axiaux).
- Pour de telles largeurs, un joint longitudinal de retrait est nécessaire. On limite la plus grande distance entre joints de retrait à 25 fois l'épaisseur du béton, soit à titre d'exemple 5 mètres pour une épaisseur de 20cm. Ce joint :
  - est exécuté par sciage de faible profondeur dans le béton en début de durcissement,
  - comporte des fers de liaison transversaux qui, dans le cas du BAC, sont les supports des armatures longitudinales.
- La mise en place du béton en 2 passes, dont la largeur serait de 2.93 m (poteaux axiaux), ou 2.73 m (poteaux non axiaux) est possible. Ce choix est plus pénalisant en terme de durée des travaux. Le joint longitudinal de construction peut être soit de type joint conjugué (moulage d'un profil vertical sinueux), soit comporter des fers de liaison transversaux tous les mètres environ, à insérer dans le béton frais de la première bande.
- Dans les courbes de faible rayon deux difficultés sont prévisibles :
  - la faisabilité de la mise en place en 1 passe de grande largeur. Les points de repère suivants peuvent être donnés : a) des giratoires de rayon intérieur 21 m ont été réalisés en BAC avec machine à coffrage glissant de largeur 4.50m ; b) sur un projet tel que Saint Denis-Sarcelles, les rayons intérieurs des courbes descendent à 15m.
  - la faisabilité du moulage de la réservation 7 cm x 20 cm pour le rail central. Une mise en œuvre manuelle avec coffrages fixes sera probablement nécessaire dans de telles courbes.



Figure 1 : Coupe transversale de la plate-forme en situation de poteaux axiaux, ou non axiaux.

## II-2.2 Propositions techniques

- Dans les deux cas envisagés (réalisation du BAC en une ou en deux passes), l'aspect de l'ouvrage et son comportement mécanique sera le même : chaussée unique avec joint longitudinal axial.
- Réserve pour le rail : sa profondeur de 7 cm impose d'examiner de près son interaction avec les armatures longitudinales du BAC situées à mi-épaisseur de la dalle. Ceci impose une épaisseur de BAC d'une vingtaine de cm au minimum, et/ou d'adopter éventuellement certaines dispositions particulières telles que :
  - la suppression d'une ou deux armatures à l'aplomb de la réserve,
  - un léger abaissement du lit d'armatures (1 à 2 cm par exemple),
  - une surépaisseur localisée du béton.

Une solution pourrait être aussi de réaliser, au lieu d'une structure du type BAC sur couche de fondation traitée, une structure BAC plus épaisse sans couche de fondation.

Nota : ces éléments de réflexion correspondent à la coupe-type définie par le cahier des charges. D'autres options de conception sont envisageables, par exemple celle dissociant la réalisation de la longrine de celle des pistes de roulement.

- Ferrailage des ancrages des poteaux : il faudrait connaître les sujétions liées aux ancrages des poteaux axiaux, de manière à pouvoir examiner la compatibilité avec les

aciers du BAC. Le cas échéant, cela peut orienter vers une plate-forme sans poteaux axiaux.

- Virages serrés : les changements de direction à 90° au droit de certains carrefours posent des questions de mise en œuvre à examiner très à l'amont. Pour la technique BAC, d'une part les aciers seront 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 pourra être nécessaire. Il conviendra de définir le rayon minimal permettant à une slip-form de mouler la réservation pour le rail.
- Franchissement des ouvrages d'art : des dispositions particulières sont à adopter pour le franchissement d'un passage inférieur (PI) par une chaussée en BAC
  - soit franchissement de l'ouvrage par le BAC,
  - soit interruption du BAC au droit de la culée.

On pourra se reporter aux exemples de franchissement illustrés par le Guide technique Chaussées en béton (LCPC-SETRA mai 1997) : cf. figure 3.6 Exemple de franchissement d'un passage inférieur de faible ouverture par une chaussée en béton armé continu, et figure 3.7 Exemple d'interruption d'une chaussée en béton armé continu à l'abord d'un passage inférieur de grande longueur. Ces dispositions seront à combiner avec celles qui intéressent le rail de guidage au droit des ouvrages d'art.

- Joints transversaux de construction (reprises de bétonnage). On pourra également se reporter au même guide, qui propose un profil vertical de joint longitudinal : cf. figure 3.17 Profil vertical du joint longitudinal entre deux bandes de béton.
- Joints transversaux d'extrémités : différentes réalisations de ce type de joint, en fonction de la nature de la structure de chaussée à raccorder, sont proposées dans le guide, cf. figure 3.8 Joints transversaux d'extrémité.

## **II-3 Caractéristiques mécaniques des matériaux**

### II-3-1 Matériaux pour assises

On propose de considérer 2 niveaux de qualité des matériaux pour assises :

- la qualité Q1 correspondant à la qualité normalement obtenue sur chantiers,
- la qualité Q2 correspondant à des conditions de réalisation dégradées, en raison par exemple de phasages compliqués des travaux, de l'exiguïté des chantiers, des diverses contraintes urbaines, ...

Les performances sont alors diminuées de :

- 10% pour les modules des bétons
- 10 à 15% pour les contraintes admissibles.

### II-3-2 Types de structures de chaussées

Pour cette étude générale de dimensionnement, nous proposons de se limiter aux structures en BAC éprouvées du Catalogue des Structures 1998 :

- Structure de type 19 : BAC sur fondation en béton maigre,
- Structure de type 21 : BAC sur BBSG sur couche de forme traitée au liant hydraulique.

Les normes françaises auxquelles se réfèrent les matériaux composant ces structures sont les suivantes :

- BAC : Béton Armé Continu de classe 5 (BC5) armé par des fers ronds : Norme NF P 98 170,
- Béton maigre : béton de classe 2 (BC2) : Norme NF P 98 170,
- BBSG : béton bitumineux semi-grenu : Norme N FP 98 130.

Les valeurs numériques des paramètres nécessaires au dimensionnement sont rassemblées dans le tableau 2.

### II-3-3 Sols supports : conditions envisagées

Le tableau 1 ci-dessous indique les hypothèses de sols supports envisagées. Selon le type de structure (BAC/BC2 ou BAC/BBSG) et sa localisation (section courante ou carrefour), le nombre de portances de sol différentes étudiées sera de quatre, comme spécifié par le cahier des charges, ou réduit à trois ou à deux.

Portances de sol pour lesquelles le dimensionnement sera étudié			
35 Mpa	75 MPa	120 MPa	200 MPa
<b>structure BAC/BC2 en section courante et station</b>			
oui, sur couche de forme traitée ou non traitée (*)	oui	oui	oui
<b>structure BAC/BC2 en carrefour</b>			
non	oui	oui	oui
<b>structure BAC/BBSG en section courante et station</b>			
non	non	oui, sur couche de forme traitée ou non traitée (**)	oui, sur couche de forme traitée ou non traitée (**)
<b>structure BAC/BBSG en carrefour</b>			
non	non	oui, sur couche de forme traitée	oui, sur couche de forme traitée

(\*) sur le réseau routier national, la portance minimale serait de 50 Mpa

(\*\*) sur le réseau routier national on aurait nécessairement une couche de forme traitée

Tableau 1 : Structures en BAC, valeurs de portance des sols supports envisagées

module E (Mpa)	$\sigma_6$ (Mpa)	-1/b	SN	Sh (m)	kc	kd
<b>BAC, qualité de réalisation Q1</b>						
35 000	2.15	16	1	0.01	1.5	1/1.47
<b>BAC, qualité de réalisation Q2</b>						
31 500	1.90	16	1	0.01	1.5	1/1.47
<b>BC2, qualité de réalisation Q1</b>						
24 000	1.63	15	1	0.03	1.5	1
<b>BC2, qualité de réalisation Q2</b>						
21 600	1.37	15	1	0.03	1.5	1
module E (Mpa)	$\varepsilon_6$ ( $\mu$ déf.)	-1/b	SN	Sh (m)	kc	
<b>BBSG, qualité de réalisation Q1</b>						
5 400	100	5	0.25	0.01	1.1	
<b>BBSG, qualité de réalisation Q2</b>						
4 300	90	5	0.25	0.01	1.1	

*nature des interfaces :*

*BAC/BC2 et BAC/BBSG glissante*

*BC2/massif support et BBSG/massif support adhérente*

Tableau 2 : Structures en BAC, valeurs des paramètres de calcul

## II-4 Caractérisation du trafic Tramway vis à vis des structures béton

Nous illustrerons dans ce §II-4 la démarche de calcul de l'agressivité des rames de tramways sur pneus, en réalisant les calculs du CAM corrigé pour un exemple de structure rigide. Comme indiqué au § I-2-3, la correction par rapport au trafic routier classique porte sur la prise en compte de :

- l'histogramme des charges à l'essieu fourni par le cahier des charges,
- la canalisation totale de la circulation,
- l'effet de superposition des sollicitations dans les matériaux aux croisement des rames, en raison du rapprochement des voies.

### II-4-1 Prise en compte de l'histogramme des charges à l'essieu

La structure considérée sera la structure suivante :

18 cm BAC / 15 cm BC2 / sol support 120 MPa

La contrainte de traction créée par la charge de référence du dimensionnement routier (jumelage de poids total 65 kN) à la base du BAC dans cette structure est calculée par Alizé, de même que les contraintes résultant des différentes charges sur essieux simples décrivant l'histogramme du cahier des charges. Le calcul prend en compte le coefficient de majoration dynamique de 1.20 spécifié par le cahier des charges.

Charges à l'essieu	Nombre d'essieux du trafic cumulé standard	Pourcentage du trafic	contrainte $\sigma$ x 1.20 (MPa)	Nombre d'essieu équivalent
5.50	750 000	10.7%	1.01	1 133
6.00	610 000	8.7%	1.10	3 709
6.50	1 080 000	15.4%	1.19	23 632
7.00	2 880 000	41.0%	1.28	206 262
7.50	1 610 000	22.9%	1.38	347 747
8.00	100 000	1.4%	1.47	60 659
total=	7 030 000	100.0%		643 142
Coefficient d'agressivité moyenne de l'essieu avant prise en compte de la canalisation et de l'effet croisement =				<b>0.091</b>
Coefficient d'agressivité moyenne de la rame avant prise en compte de la canalisation et de l'effet croisement =				<b>0.412</b>

#### II-4-2 Prise en compte de canalisation totale de la circulation

Nous avons considéré, pour caractériser le balayage latéral du trafic routier courant l'histogramme des excentremets adopté en général, notamment pour la reproduction du balayage sur le manège de fatigue du LCPC. Les contraintes de traction créées dans le béton dans l'axe central de la bande de roulement (excentrement nul) par la roue simple chargée à 35 kN sont calculées par Alizé. Le coefficient additionnel CAc traduisant la canalisation du trafic tramways sobtient selon la démarche écrite au § I-2.3.

Excentrement (m)	pourcentage de trafic	contrainte $\sigma$ (MPa)
-0.75	2%	0.477
-0.5	6%	0.798
-0.25	18%	1.411
-0	26%	1.51
0.25	25%	1.411
0.50	15%	0.798
0.75	6%	0.798
1.00	3%	0.298
Coefficient CAc de canalisation =		<b>2.47</b>

#### II-4-3 Prise en compte des effets de croisement

La distance minimale entre les axes de circulation des roues de deux rames au moment des croisements est de 0.93 mètre en l'absence de poteau central, et de 1.33 mètres en présence de poteau central. Dans le premier cas, nous avons évalué la majoration de l'agressivité des rames qui résulterait du choix de réaliser les dimensionnement en prenant en compte une majoration pour effet de croisement appliquée à l'ensemble du trafic.

Pour la roue simple chargée à 3.5 tonnes, la contrainte de traction maximale à la base du béton passe de 1.07 Mpa hors croisement avec une autre rame, à 1.242 Mpa en situation de croisement avec une rame. Ces valeurs conduiraient à la majoration suivante de l'agressivité du trafic :

$$\mathbf{CAcr \sim 10}$$

La majoration obtenue est très élevée et pénaliserait gravement le dimensionnement. L'hypothèse de croisement systématique est en fait peu réaliste. Il y aura donc lieu de préciser obligatoirement la fréquence et les situations de croisement des rames à prendre en compte dans les calculs.

## II-5 Evaluation des effets de bord

La structure en béton étudiée se différencie de la structure rigide routière ou autoroutière courante, par l'absence de sur-largeur (cf.§II-1). Le dimensionnement des chaussées en béton prend en compte la présence de cette sur-largeur, à travers le coefficient  $k_d$  appelé coefficient de discontinuité des chaussées rigides. Ce coefficient de discontinuité traduit globalement la majoration des contraintes de traction par flexion dans le béton qui résulte des dimensions géométriques des dalles et de la présence de gradients verticaux de température dans l'épaisseur du béton. Il faut entendre ici majoration par rapport aux contraintes calculées par le modèle multicouche semi-infini.

Le coefficient de discontinuité intervient dans l'expression de la contrainte admissible :



$k_c$  est le coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé de chaussées du même type.

$k_f$  est un coefficient qui ajuste la valeur de déformation admissible au risque de calcul retenu en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur et sur les résultats des essais de fatigue.

Pour prendre en compte dans le dimensionnement des plate-formes de tramways sur pneus la modification des effets de discontinuité résultant de l'absence de sur-largeur, nous proposons d'introduire un coefficient correcteur  $k_d'$  dans l'expression de la contrainte admissible. Ce coefficient sera déterminé à l'aide de modélisations tri-dimensionnelles de la structure de chaussée, réalisées avec le logiciel aux éléments finis César-LCPC. Ce type de modélisation EF-3D permet de reproduire la géométrie complète de la structure de chaussée, ce qui n'est pas le cas avec le modèle classique multicouche semi-infini.

A l'aide du modèle EF-3D, nous simulerons :

- la structure en BAC avec les sur-largeurs habituelles ;
- la structure en BAC avec les sur-largeurs retenues pour le projet de tramway sur pneus.

La comparaison des contraintes obtenues à partir des deux modélisations permettra de déterminer le coefficient correcteur  $k_d'$ .

La démarche devra être réalisée pour des conditions thermiques différentes. La loi de Miner permettra d'intégrer les résultats. Il est prévisible que la valeur de  $k_d'$  sera sensible à l'épaisseur de béton, il sera donc nécessaire de réaliser ce calcul pour une structure rigide mince et pour une structure rigide plus épaisse.

Ce coefficient étant déterminé, il sera possible de déterminer les sollicitations admissibles à la base du béton de ciment en considérant les hypothèses sur les données de trafic et sur les matériaux.

La nouvelle formule utilisée pour déterminer les contraintes admissibles sera :

$$\sigma_{\text{tad}} = \sigma_6 \times \left( \frac{NE}{10^6} \right)^b \times k_c \times k_r \times k_d \times k_d'$$

Le logiciel Alizé-LCPC permettra alors d'ajuster les épaisseurs de couches de matériaux de chaussées pour obtenir une contrainte à la base du béton de ciment inférieure à la contrainte admissible.

### III- DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES BITUMINEUSES

#### III-1 Avis sur les options a1 et a2 du cahier des charges

L'option a1 - GB correspond à la réalisation d'une assise de chaussée en grave-bitume, qui sera ensuite tranchée afin de couler une longrine en béton armé devant supporter le rail de guidage. La couche de surface de la chaussée sera ensuite mise en place, et réglée sur le niveau du rail.

L'option a2 - EME est analogue à la précédente, avec une assise de chaussée en enrobés à module élevé.

*Remarque préliminaire sur le croquis de principe du cahier des charges p.3 :*

Ce croquis suggère que la base de la longrine se situera au sein du corps de chaussée. Au contraire, un pré-dimensionnement très sommaire de la structure de chaussée d'une part, et de la longrine d'autre part (pour encaisser en particulier l'effort vertical accidentel, cf. Cahier des charges), conduit à envisager d'ores et déjà que le tranchage traversera la chaussée sur toute son épaisseur. La base de la longrine reposerait alors sur le sol support, et non sur une assise bitumineuse.

Ceci laisse entrevoir deux natures de risques :

- le risque de décompression du sol support de la chaussée au cours de l'exécution des travaux, pouvant se traduire par la majoration des efforts dans les couches d'assises bitumineuses, entraînant l'apparition de désordres plus ou moins graves dans ces couches ;
- le risque d'enfoncement de la longrine au cours de la vie de l'ouvrage, en particulier en cas d'infiltrations d'eau par les joints de contact longrine/chaussée, ce qui pourraient faire chuter la portance des sols. Ce risque serait amplifié dans les carrefours, sous l'effet des charges verticales du trafic transversal poids lourds s'appliquant directement sur la longrine par l'intermédiaire du rail.

L'extrême canalisation des tramways, due au guidage par rail central, nécessite de la part des matériaux bitumineux un très haut niveau de performance 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 : ces contraintes ne figurent pas dans le cahier des charges.

A titre de repère, on peut citer les tolérances altimétriques suivantes, figurant dans les documentations techniques de deux constructeurs, Translhor et Bombardier.  $\Delta H$  désigne la dénivelée entre le rail et le revêtement de chaussée :

Translhor :	$-1.5 \text{ cm} < \Delta H < +0.5 \text{ cm}$
Bombardier :	$-1.0 \text{ cm} < \Delta H < +1.5 \text{ cm}$

Pour répondre à cet objectif, on propose l'emploi des matériaux suivants :

- en assise de chaussée :
  - grave-bitume de classe 4 (GB4), cf. norme NF P 98-138,
  - ou enrobé à module élevé de classe 2 (EME2), cf. norme NF P 98-140.
- en couche de roulement :
  - en section courante : béton bitumineux semi-grenu de classe 3 (BBSG), cf. norme NF P 98-130
  - au droit des stations : enrobé percolé (produit non normalisé).

La grave-bitume de classe 4 (GB4), grâce à un module de richesse élevé et une compacité accrue, présente des performances mécaniques améliorées : module, résistance en fatigue, résistance à l'orniérage. Le surcoût par rapport à une grave-bitume courante (GB3) est très faible, de l'ordre de quelques pour-cent.

L'enrobé à module élevé de classe 2 (EME2) est, grâce à l'utilisation de liant dur, le matériau bitumineux le plus performant, autorisant des dimensionnements de chaussées légèrement réduits par rapport aux grave-bitumes, et présentant une résistance à l'orniérage comparable à celle de la GB4.

Le béton bitumineux semi-grenu (BBSG) sera de classe 3 afin de présenter les meilleures performances à l'orniérage : son épaisseur d'application optimale est de 5 à 6 cm par couche.

L'enrobé percolé (béton bitumineux drainant percolé par un coulis de ciment) permettrait de bien différencier visuellement les zones de station, avec une sécurité accrue vis-à-vis de l'orniérage dans ces zones où le trafic est très ralenti : son épaisseur optimale est de 4 à 5 cm .

Les propositions de matériaux de couche de roulement ci-dessus seront retenues pour les calculs de dimensionnement. Au stade de la réalisation des travaux, des matériaux particuliers d'entreprise à vocation anti-orniérante pourront être retenus.

### **III-2 Hypothèses pour le dimensionnement de la longrine – question Q1**

La conception de la plate-forme pour voie Tramways sur pneus dans le cas de la solution bitumineuse associe la fonction Chaussée à la fonction Ouvrage en béton armé de génie civil. Ceci rend complexe le fonctionnement de cette structure, et délicat son dimensionnement, vis à vis duquel une marge importante de sécurité sera indispensable. Le bon fonctionnement du système impose en effet 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 fréquemment le siège des dégradations plus ou moins graves et prévisibles, en particulier en régime de fonctionnement dynamique et vibratoire, ce qui est ici le cas. Ces ouvrages nécessitent, dès la conception, des choix et aménagements particuliers. Par ailleurs, ils doivent obligatoirement être l'objet de surveillance, d'entretien et de maintenance rigoureuses pendant toute leur durée de service, au risque de voir rapidement se dégrader les fonctionnalités de la structure.

Les risques de désordre qu'entraînent les vibrations créées par les charges roulantes, les infiltrations d'eau qui seront inévitables dès le court ou moyen terme, enfin le fait que la longrine se trouvera assise sur le massif de sol et non sur les couches bitumineuses, ont

été exposées plus haut. Les risques sont évidemment majorés dans les carrefours, zones dans lesquelles sont également appliquées à la longrine les charges du trafic routier transversal.

Nous attirons l'attention sur l'existence de jeu qui caractérise le fonctionnement dynamique de l'ouvrage complet, avec le risque de développement de déplacements latéraux permanents qui caractérisent le vieillissement des pièces mécaniques présentant du jeu ou des jeux. Des données supplémentaires sur la tolérance de positionnement latéral du rail (par exemple à la liaison entre deux longrines successives) pourraient être requises.

La prudence s'impose donc dans le choix des hypothèses pour le dimensionnement de la longrine. Nous proposons les hypothèses suivantes :

- vis à vis des sollicitations verticales : absence totale de liaison entre les faces verticale de la longrine et la structure de chaussée encaissante. La reprise des efforts verticaux sera assurée par le poids propre de la longrine, et par la réaction verticale du support.
- vis à vis des sollicitations latérales : développement progressif d'une fissure ouverte entre les faces verticales de la longrine et la chaussée. La reprise des efforts latéraux se fait par mobilisation du frottement entre le béton et le support, en sous-face de la longrine. Les fluctuations d'ouverture de la fissure sur la longueur de la longrine (25 mètres à 40 mètres) rend trop incertaine l'hypothèse d'un appui latéral continu, et peut engendrer des effets de flexion significatifs en situation de points durs (fissure localement fermée) distants. Nous adopterons la valeur  $f=0.15$  pour le coefficient de frottement entre la longrine et son support.

Outre le dimensionnement vis à vis des sollicitations appliquées à la longrine par le matériel roulant, la vérification vis à vis du risque de flambement sera également à effectuer.

### **III-3 Caractéristiques mécaniques des matériaux**

#### III-3.1 Matériaux pour assises

Pour tenir compte des vitesses réduites, notamment aux abords des stations, la fréquence pour le choix des valeurs des modules des matériaux bitumineux dans le dimensionnement seront minorées. Ceci se traduira par des valeurs de modules moindres que les valeurs de modules obtenues par les hypothèses standards :

- hypothèses standards : fréquence  $f = 10\text{Hz}$   
modules des matériaux bitumineux : E
- hypothèses Tramways sur pneus : fréquence  $f = 5\text{Hz}$   
modules des matériaux bitumineux : E-20%

Comme cela a été proposé pour les bétons (cf. §II.3), deux niveaux de qualité des matériaux bitumineux pour assises seront envisagés :

- la qualité Q1 correspondant à la qualité normalement obtenue sur chantiers,
- la qualité Q2 correspondant à des conditions de réalisation dégradées. Les performances seront alors diminuées de :
  - 20% pour les modules,
  - 10% pour les déformations admissibles.

#### III-3.2 Types de structures de chaussées :

Les structures bitumineuses de référence du Catalogue des Structures 1998 sont :

- Structure de type 2 : BBSG sur GB3 (en une ou deux couches). Comme cela est proposé plus haut, on préférera la grave-bitume GB4 à la GB3.
- Structure de type 3 : BBSG sur EME2 (en une ou deux couches).

Les normes françaises auxquelles se réfèrent les matériaux composant ces structures sont les suivantes :

- BBSG : béton bitumineux semi-grenu – Norme NF P 98 130,
- GB4 : grave-bitume de classe 4 - Norme NF P 98 138,
- EME2 : enrobé à module élevé de classe 2 – Norme NF P 98 140.

Les valeurs numériques utilisées pour le calcul sont rassemblées dans le tableaux 4.

### III-3.3 Sols supports

Le tableau 3 indique les hypothèses de sols supports envisagées : leur nombre serait selon les cas maintenus à 4 (conformément au Cahier des charges), ou réduit à 3.

Portances de sol pour lesquelles le dimensionnement sera étudié			
35 Mpa	75 MPa	120 MPa	200 Mpa
<b>structure BBSG/GB4 en section courante et station</b>			
oui	oui	oui	oui
<b>structure BBSG/GB4 en carrefour</b>			
non	oui	oui	oui
<b>structure BBSG/EME2 en section courante et station</b>			
oui (*)	oui	oui	oui
<b>structure BBSG/EME2 en carrefour</b>			
non	oui	oui	oui

(\*) sur le réseau routier national, la portance minimale serait de 50 Mpa

Tableau 3 : Structures bitumineuses, valeurs de portance des sols supports envisagées

module E (Mpa)	$\epsilon_6$ ( $\mu\text{d}\acute{e}f.$ )	-1/b	SN	Sh (m)	kc
<b>BBSG, qualité de réalisation Q1</b>					
4 320	100	5	0.25	0.01	1.1
<b>BBSG, qualité de réalisation Q2</b>					
3 460	90	5	0.25	0.01	1.1
<b>GB4, qualité de réalisation Q1</b>					
8 800	100	5	0.30	0.025	1.3
<b>GB4, qualité de réalisation Q2</b>					
7 050	90	5	0.30	0.025	1.3
<b>EME2, qualité de réalisation Q1</b>					
11 200	130	5	0.25	0.025	1.0
<b>EME2, qualité de réalisation Q2</b>					
9 000	117	5	0.25	0.025	1.0

*nature des interfaces : toutes interfaces adhérentes*

Tableau 4 : Structures bitumineuses, valeurs des paramètres de calcul

### III-4 Caractérisation du trafic Tramway vis à vis des structures bitumineuses

Nous avons illustré au § II-4 les modalités de calcul pour la prise en compte dans le dimensionnement d'une structure rigide en BAC, des spécificités du trafic tramways sur pneus sur l'agressivité. La démarche pour les structures bitumineuses est similaire. Dans l'attente d'hypothèses complémentaires concernant la prise en considérations des effets de croisement des rames (fréquences, chargements des rames à combiner, ...), nous ne présentons pas ici d'exemple de calcul pour les chaussées bitumineuses.

### III-5 Evaluation de l'effet longrine et des effets de bords

En raison de la proximité longrine – bande de circulation des pneumatiques d'une part, et du profil en travers de la plate-forme de tramway d'autre part, la structure à dimensionner diffère d'une chaussée bitumineuse routière classique, pour laquelle l'hypothèse des couches semi infinies dans le plan horizontal se justifie relativement bien. Comme cela a été proposé pour les structures en béton (cf. §II-5), l'influence des conditions géométriques propres à la plate-forme tramways sur pneus sera prise en compte dans le dimensionnement, par un coefficient additionnel  $k_g$ , appliqué à l'expression des déformations de traction par flexion admissibles.

Rappelons l'expression de  $\varepsilon_{\text{tad}}$  pour les matériaux bitumineux (cf. § I-1.2) :



Le coefficient correcteur additionnel  $k_g$  sera déterminé selon la démarche suivante. Une première modélisation *a priori* sera réalisée avec le modèle Alizé, puis la structure complète sera modélisée en EF-3D avec le logiciel César. Les élongations issues de ces deux calculs permettront de déterminer la valeur du coefficient  $k_g$ , comme décrit dans la partie II pour les structures en béton. La seule différence dans la méthode de détermination du coefficient correcteur est que le cas de référence peut être modélisé sous Alizé et non obligatoirement avec César.

La nouvelle formule utilisée pour le calcul des élongations admissibles sera :

$$\varepsilon_{\text{tad}} = \varepsilon_6(10^{\circ}\text{C}, 25\text{Hz}) \times \left( \frac{\text{NE}}{10^6} \right)^b \times k_c \times k_r \times k_s \times k_g$$

Ayant déterminé le coefficient  $k_g$ , il sera possible, à l'aide du logiciel Alizé d'ajuster les épaisseurs de couches de matériaux pour obtenir des élongations calculées inférieures aux élongations admissibles.