

## Actions dues au trafic Tram-Train

La conception des infrastructures à construire pour la circulation des tram-trains requiert la modélisation des différents cas de charges induits par ce type de trafic. Il s'agit alors d'étudier l'ensemble des cas de charges qui sont spécifiques au type de trafic étudié.

L'Eurocode 1 Actions sur les structures – Partie 2 : Actions sur les ponts, dues au trafic (NF EN 1991-2) ne traite que les actions du trafic ferroviaire des grandes lignes du réseau européen et précise que le chargement et les valeurs caractéristiques des actions des trafics légers, comme le tram-train, sont définis pour le projet individuel.

Le Réseau Ferré de France et la Direction de l'Ingénierie de la SNCF ont sorti un Référentiel Infrastructure sur la conception des infrastructures pour la circulation des matériels de type tram-train ou train léger. Dans l'annexe de ce référentiel (IN3128) on trouve une reprise des concepts de la norme NF EN 1991-2 et l'adaptation des principes aux particularités des tram-trains. En se fondant sur ce référentiel, encore provisoire, et avec un esprit critique, nous avons défini les actions propres du tram-train de l'Ile de La Réunion.

Dans le cadre des ouvrages d'art non courants étudiés, les actions dues aux circulations de tram-train à considérer sont :

- Les charges verticales
- Les effets dynamiques
- Les forces d'accélération et de freinage
- L'effort de lacet
- Les forces centrifuges

En outre, il convient de prendre aussi en compte les charges de superstructures. En effet, celles-ci répondent aux spécificités liées à la circulation du trafic tram-train.

### Les charges verticales

Le modèle de charge 71 représente l'effet statique dû à un trafic ferroviaire standard. Il ne décrit pas de charges réelles. Il a été sélectionné afin que ses effets, les majorations dynamiques étant prises en compte séparément, représentent ceux du trafic réel. La disposition et les valeurs caractéristiques des charges verticales doivent être les suivantes :

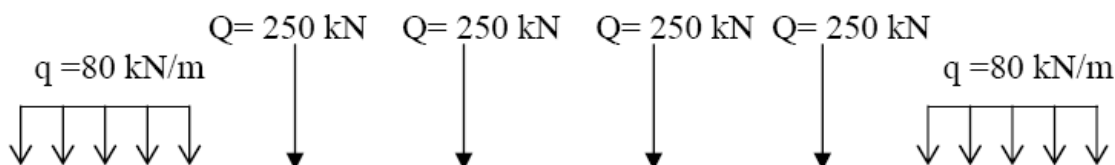


Figure 8 : Modèle de charges 71

La charge uniformément répartie doit être appliquée selon les lignes d'influence.

L'Eurocode propose de multiplier ces valeurs caractéristiques par un coefficient  $\alpha$  sur les lignes où un trafic ferroviaire plus lourd ou plus léger que le trafic normal circule. Le coefficient  $\alpha$  prend des valeurs comprises entre 0,75 et 1,46. Il doit également être appliqué aux forces centrifuges, l'effort de lacet si  $\alpha > 1$  et les forces d'accélération et de freinage.

Parmi l'ensemble des modèles présentés dans les Eurocodes, l'IN3128 propose d'utiliser exclusivement, pour les Tram-Trains sur voies dédiées comme celui de la Réunion, le modèle de charge 71 affecté d'un coefficient  $\alpha \leq 1$ . Il est suggéré de choisir le coefficient  $\alpha$  en fonction de la portée conformément à la loi suivante :

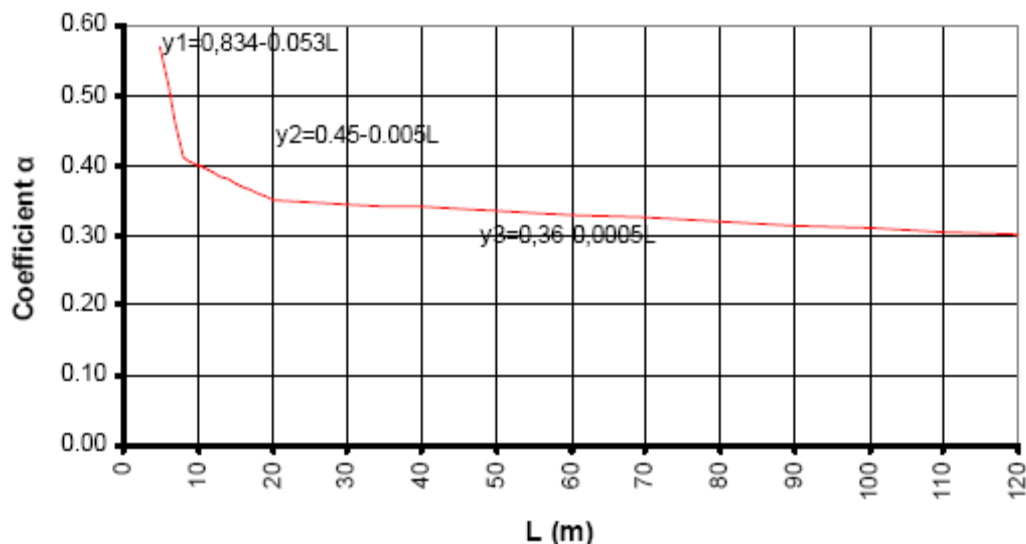


Figure 9 : Coefficient  $\alpha$  proposé par l'IN3128

$L$  = portée pour les travées isostatiques et  $L = \min(L_1, L_2, \dots, L_n)$  pour les ponts continus de portées  $L_1, L_2, \dots, L_n$ .

Le modèle de charge UIC affecté du coefficient  $\alpha$  "couvre" les effets :

- de trans-trains à 125 kN par essieu en charge exceptionnelle (3 modèles de rame) pouvant circuler dans les configurations suivantes :
  - Convoi constitué d'une seule rame
  - Convoi à 2 rames
  - 2 Convois à une rame distants de 30 m
- de convois de 4 rames vides (70 kN par essieu)
- de charges routières réparties du type A(l) et Bc (du titre II du fascicule 61) pour un pont de classe 3 à une seule voie chargée de 3,6 m de large
- d'un train de maintenance occasionnel prévu pour le meulage des rails, circulant à faible vitesse et de 180 kN/essieu

Le projet Tram-Train de St Paul à St Benoit était initialement prévu pour transiter des voyageurs. Cependant, le maître d'ouvrage a réfléchi à la possibilité d'utiliser cette infrastructure pour un trafic de transport de marchandises. Ce transport devrait s'intégrer sur la ligne sans bouleverser son exploitation, dans des conditions techniques et économiques intéressantes. L'analyse de viabilité économique de l'utilisation pour le transport de marchandises a été menée par le Cabinet Jonction en octobre 2003 pour le compte de la Région Réunion. Les conclusions ont dégagé un intérêt économique de transporter certaines matières sur un secteur délimité entre le Port et St André.

L'absence d'un réseau ferré pour la circulation de marchandises a donc amené la Région Réunion à vouloir profiter du projet Tram-Train pour faire circuler aussi un Tram-Train Fret. Par contre, les modèles de rames utilisés pour déterminer la loi du coefficient alpha ci-dessus diffèrent de ceux qui sont envisagés dans le cadre du projet de Tram-Train à l'île de la

Réunion. La Division de la Recherche Calcul Spéciaux du Département des Ouvrages d'Art de la SNCF a calculé les sollicitations induites par les tram-trains réels (cf. annexe 1) et les a caractérisé par rapport au modèle de charge 71. Le rapport des sollicitations réelles à celles du modèle de charge 71 (coefficient  $\alpha$ ) a été calculé et présenté sous la forme de la loi ci-dessous.

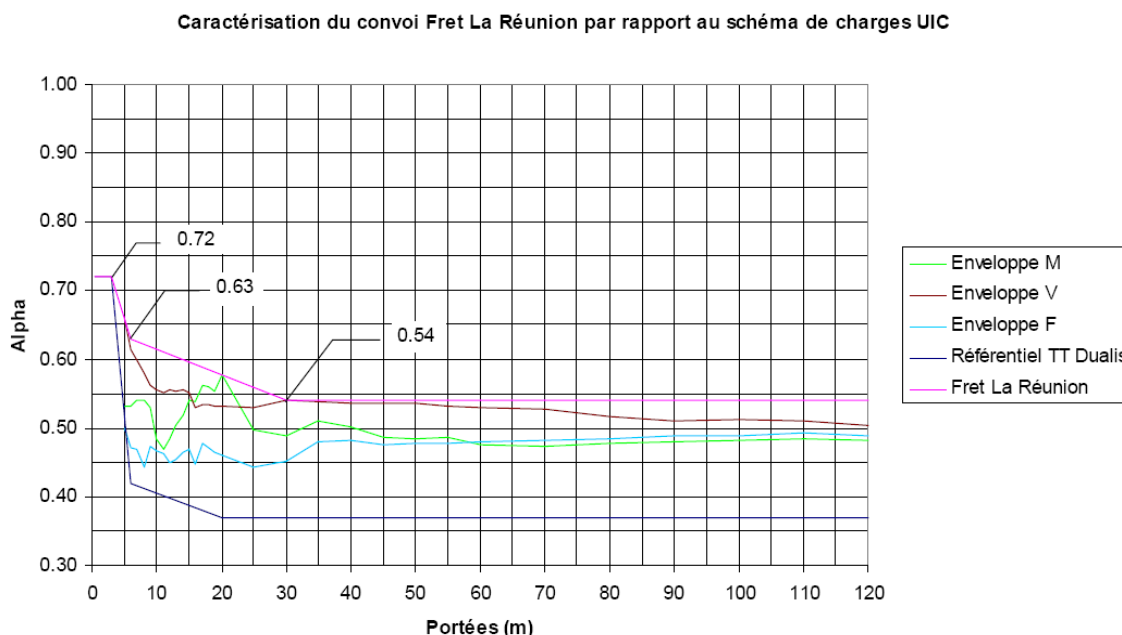


Figure 10 : Coefficient  $\alpha$  correspondant au tram-train de La Réunion

Notons que la circulation du fret induit des contraintes bien supérieures à celles qui correspondent à un projet de Tram-Train type, tel que défini dans l'IN3128. Les ouvrages d'art non courants (avec des portées supérieures à 30 mètres en général) qui concerne le projet doivent donc supporter un trafic de l'ordre de 55% plus lourd.

Par rapport à l'excentricité des charges verticales, on reprend le point 6.3.5 de la norme NF EN 1991-2. L'effet du déplacement latéral des charges verticales doit être pris en considération en limitant, pour tous les essieux, le rapport des charges de roues d'un même essieu à 1,25 : 1,00 sur n'importe quelle voie. L'excentricité qui en résulte vaut donc  $e \leq r/18$ , où  $r$  est l'écartement des rails.

## Les effets dynamiques

D'après le point 6.4.4 de la norme NF EN 1991-2, l'analyse dynamique des ouvrages considérés n'est pas requise, car la vitesse de circulation est inférieure à 200km/h et les ponts sont à travées continues. Il n'y a donc pas de risque de résonance ou de vibrations excessives du pont (avec le risque d'accélération excessives du tablier conduisant à l'instabilité du ballast, de déformations et de contraintes excessives, etc.). Etant donné que les ouvrages étudiés supportent plusieurs voies, il convient de ne procéder à aucune réduction du coefficient dynamique  $\Phi$ .

Le coefficient dynamique  $\Phi$ , qui majore les effets statiques dus aux modèles de charge doit être pris égal à  $\Phi_2$  ou  $\Phi_3$  en fonction de la qualité de l'entretien de la voie. On considère que

les voies des ouvrages du secteur de La Montagne seront soigneusement entretenues et l'on retiendra donc dans nos calculs la valeur :

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,82$$

Avec :  $1,00 \leq \Phi_2 \leq 1,67$  et  $L_\Phi$  longueur « déterminante » donnée dans le tableau 6.2 de la norme NF EN 1991-2. Lors du calcul des contraintes locales et transversales, on adopte la valeur correspondante du tableau donné par le cas 4.  $L_\Phi$  est à prendre selon le cas 5 si on analyse le comportement longitudinal du pont.

## Les forces d'accélération et de freinage

Les forces d'accélération et de freinage agissent au niveau supérieur des rails, dans le sens longitudinal de la voie. Elles doivent être considérées comme des charges linéaires uniformes sur la longueur d'influence  $L_{a,b}$  de leurs effets pour l'élément structural considéré. La direction des forces d'accélération et de freinage doit tenir compte des sens des déplacements autorisés sur chaque voie. Ces forces doivent être combinées avec les charges verticales correspondantes.

D'après l'Eurocode (trains à vitesse  $> 200\text{km/h}$ ), les valeurs caractéristiques des forces d'accélération et de freinage pour le modèle de charge 71 valent :

Force d'accélération :  $Q_{lak} = 33 \text{ [kN/m]} L_{a,b} \text{ [m]} \leq 1000 \text{ [kN]}$

Force de freinage :  $Q_{lbk} = 20 \text{ [kN/m]} L_{a,b} \text{ [m]} \leq 6000 \text{ [kN]}$

Ces valeurs ne doivent être multipliées que par le coefficient  $\alpha$ .

L'IN3128 suggère de réduire les valeurs limites et d'appliquer des coefficients  $\alpha_a$  pour l'accélération et  $\alpha_f$  pour le freinage, différents du coefficient  $\alpha$  qu'il convient d'appliquer au modèle de charge 71. On trouve ainsi les expressions suivantes pour les tram-trains :

Force d'accélération =  $\alpha_a \times 33 \text{ [kN/m]} \times L_{a,b} \leq 250 \text{ [kN]}$

Force de freinage =  $\alpha_f \times 20 \text{ [kN/m]} \times L_{a,b} \leq 528 \text{ [kN]}$

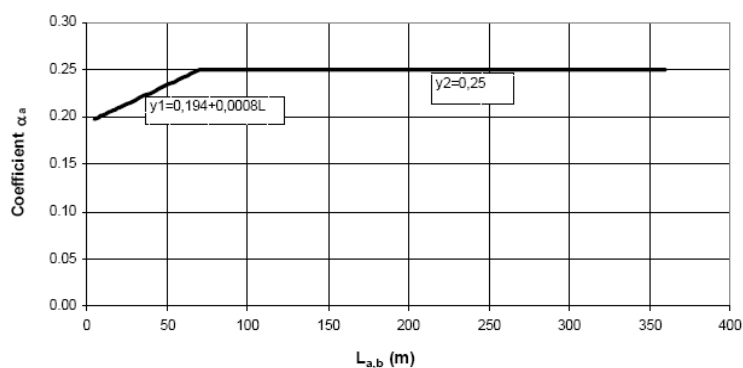


Figure 11 : Coefficient  $\alpha_a$  pour la force d'accélération

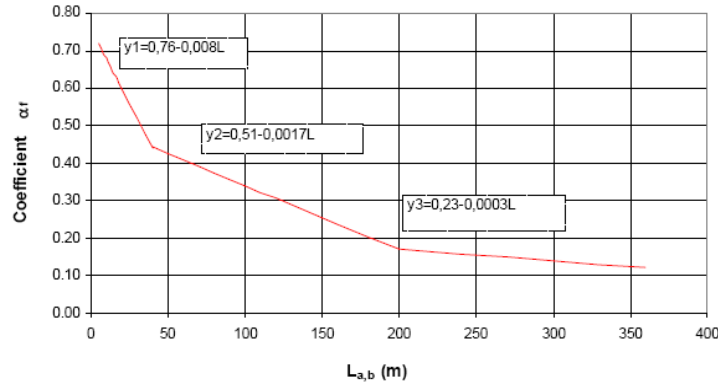


Figure 12 : Coefficient  $\alpha_f$  pour la force de freinage

Les valeurs limitées données se trouvent bien dans l'ordre de grandeur des caractéristiques du Tram Train Fret que l'on étudie, car l'accélération du fret est de  $1,1 \text{ m/s}^2$  et la décélération de 1,0 en service et 2,5 en urgence. La charge totale maximale étant de 225T, les forces induites sont de 248, 225 et 563 kN respectivement.

## L'effort de lacet

L'effort de lacet doit être considéré comme une force concentrée agissant horizontalement au niveau supérieur des rails et perpendiculairement à l'axe de la voie. Il doit être appliqué aussi bien dans le cas des voies en alignement que dans celui des voies en courbe. La valeur caractéristique de l'effort de lacet doit être prise égale à  $Q_{sk} = 100 \text{ kN}$  et elle ne doit être multipliée que par le coefficient  $\alpha$  si celui est supérieur à 1. L'effort de lacet doit toujours être combiné avec une charge verticale de trafic. Aucune modification par rapport aux valeurs données par les Eurocodes ne convient dans ce cas.

## Les forces centrifuges

Lorsque la voie est en courbe sur toute ou partie de la longueur d'un pont, la force centrifuge et le dévers de la voie doivent être pris en compte. Il convient d'appliquer les forces centrifuges comme agissant horizontalement vers l'extérieur, à une hauteur de 1,80 m au-dessus du plan de roulement et il faut les combiner avec la charge verticale de trafic.

L'analyse des forces centrifuges de l'Eurocode tient compte des vitesses inférieures à 200 km/h à travers le coefficient de réduction  $f$ . La valeur caractéristique de la force centrifuge est déterminée à l'aide des formules suivantes :

$$Q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times Q_{vk}) \quad q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times q_{vk})$$

où :  $Q_{tk}, q_{tk}$  sont les valeurs caractéristiques des forces centrifuges [kN, kN/m] ;  
 $Q_{vk}, q_{vk}$  sont les valeurs caractéristiques des charges verticales du modèle de charge 71 hors majoration pour effets dynamiques ;

f est le coefficient de réduction :  $f = \left[ 1 - \frac{V-120}{1000} \left( \frac{814}{V} + 1,75 \right) \left( 1 - \sqrt{\frac{2,88}{L_f}} \right) \right] = 1$

si  $V \leq 120$  km/h ;

v est la vitesse maximale [m/s] ;

g est l'accélération de la pesanteur [9,81m/s<sup>2</sup>] ;

r est le rayon de courbure [m].

## Les charges de superstructures

Lorsque la structure portante de l'Ouvrage d'Art Non Courant concerné a été construite, on place une chape d'étanchéité et le correspondant béton de protection sur la surface extérieure. L'épaisseur de cet ensemble est de 5 cm (-20% / +40%) et sa densité de 24 kN/m<sup>3</sup> (cf. annexe 2).

Ensuite, on met en place le béton de calage (BC5) des traverses. Les charges permanentes associées sont déterminées à partir des coupes types de pose de voie en tenant compte d'un poids volumique de 25 kN/m<sup>3</sup>. Afin d'établir un patron commun, on considère que dans un premier temps on prévoit une mise à niveau de la surface du tablier afin de récupérer la pente transversale de 1% que l'on donne à l'ensemble des structures des ouvrages étudiés. Ensuite, on verse le reste du béton de calage jusqu'à atteindre une épaisseur de 15 cm dans l'axe de l'ouvrage. Au stade de la conception où l'on est, on prévoit une marge de -20% à +25%.

Par la suite, l'architecte considère qu'il convient de mettre en place un revêtement jusqu'au niveau des rails pour donner ainsi un aspect esthétique plus agréable aux yeux de l'utilisateur. Une épaisseur de 27 cm de revêtement minéral de densité 18 kN/m<sup>3</sup> sera donc placée sur le béton de calage des traverses. On prend aussi une marge de -20% à +25% par rapport au volume de revêtement mis en œuvre.

Après avoir mis en place l'ensemble des couches décrites sur la structure de l'ouvrage d'art, il convient de placer encore un certain nombre de dispositifs. Tout d'abord, nous traitons la charge de poids propre induite par les rails. Indifféremment du type de rail (à gorge ou vignole), on prend en compte un poids linéique enveloppe pour une voie simple (2 rails) de 0,12 t/ml.

Ensuite, la structure de pose de voie fait l'objet de notre intérêt. Le type Stedef (-10DBV) est retenu pour l'ensemble d'ouvrages d'art du secteur qui nous concerne : celui de La Montagne. En supposant un nombre de traverses de 1,333 unité / ml (soit 1 traverse tous les 75cm) et conformément au dossier d'avant-projet, le poids linéique comprenant la traverse dans sa totalité (avec semelles et boulons), mais hors rail, et valable pour les deux cas de rails rencontrés, vaut 175 kg / unité, soit 0,234 t / ml pour 1 voie (marge de -5% / +5%).

L'ensemble d'ouvrages compte aussi avec la présence de deux caniveaux préfabriqués, un de chaque côté, pour l'alimentation électrique. Les dimensions de chacune de ces multitubulaires sont de 70 x 50 cm et les charges induites sont déterminées en prenant en compte un poids volumique de 25 kN / m<sup>3</sup> sans déduction des vides liés aux fourreaux (marge de -20% à +20%)

Des dispositifs anti-déraillement sont également nécessaires. Nous avons prévu des longrines en béton ( $26 \text{ kN} / \text{m}^3$ ) de  $55 \times 45 \text{ cm}$  (marge de  $-5\% / +5\%$ ). Ces longrines s'étendent sur tout l'ouvrage. Nous avons donc intérêt à réduire leur nombre afin de diminuer le coût associé au béton et la charge de poids propre. Dans ce sens, nous avons prévu, dans certains cas, des rails de sécurité.

Des longrines en béton ( $26 \text{ kN} / \text{m}^3$ ) de  $50 \times 25 \text{ cm}$  (marge de  $-5\% / +5\%$ ) sont aussi prévues pour ancrer les garde-corps. Sur ces longrines l'on place des garde-corps de  $1 \text{ kN} / \text{m}$  (marge de  $-5\% / +5\%$ ).

Finalement, il convient de prendre en considération les charges induites par la ligne aérienne de contact (LAC). Cela a fait l'objet d'une étude spécifique dont le rendu consiste à fournir les descentes de charges en pied de poteau. Ces descentes comprennent des charges permanentes, d'exploitation et les effets de la température et du vent (cf. annexe 3). La fréquence des poteaux LAC le long de l'ouvrage diffère suivant les cas considérés.