

Actions de caractère général agissant sur les OANC

Poids propre

Les effets du poids propre sont évalués sur la base des plans de coffrage en attribuant au béton armé une densité de $2,60 \text{ t/m}^3$ et à l'acier une densité de $7,85 \text{ t/m}^3$. La densité du béton armé est prise égale à $2,65 \text{ t/m}^3$ en considérant un taux de ferrailage uniforme. Les fractions forfaitaires prises en compte pour le calcul des valeurs caractéristiques du poids propre sont de -4% / $+6\%$. L'accélération de la pesanteur est prise égale à $9,81 \text{ m/s}^2$.

L'effort du vent

Le calcul de tout ouvrage d'art nécessite prendre en considération les efforts du vent sur la structure. Ce calcul est d'une importance particulière lorsque l'on s'intéresse à des ouvrages d'art sur l'île de La Réunion, affectés régulièrement par le passage de cyclones. Afin de déterminer la force pertinente, on adopte la configuration suivante :

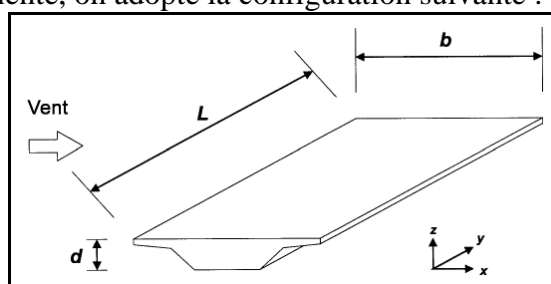


Figure 13 : Directions des actions du vent sur les ponts

D'après l'Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-4 : Actions générales - Actions du vent (NF EN 1991-1-4), la force de vent dans la direction x qui agit sur un tablier de pont est égale à :

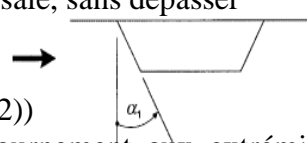
$$F_W = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 * C * A_{ref,x} \text{ où :}$$

- ρ : Masse volumique de l'air = $1,225 \text{ kg/m}^3$ (référence 4.5 AN NOTE 2 ; Hypothèse : France)
- v_b : Vitesse de référence du vent = 34 m/s (référence 4.2 AN NOTE 2 ; Hypothèse : Réunion)
- C : Coefficient de force du vent = $c_e * c_{f,x}$ (à majorer de 20% si catégorie de terrain 0) où :
 - c_e : Coefficient d'exposition $q_p(z)/q_b$ (référence 4.5)
 - $q_p(z)$: Pression dynamique de pointe à $z = [1+7 * l_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z)$ (référence 4.5) où :
 - ❖ $l_v(z)$: Intensité de turbulence = $k_l / (c_0(z) * \ln(z/z_0))$ (référence 4.4) où :
 - k_l : Intensité de turbulence = $c_0(z) * [1 - 2 * 10^{-4} * (\log_{10}(z_0) + 3)^6]$ (référence 4.4 AN NOTE 2 ; Hypothèse: absence d'obstacles bien individualisés)

- $c_0(z)$: Coefficient d'orographie = $1+0,004*\Delta A_c*e^{-0,014*(z-10)}$ pour $z \geq 10$ m
 = $c_0(10)$ pour $z < 10$ m
 (réf 4.3.3 (1) AN ; Hypothèse : absence d'obstacles bien individualisés) où :
 - ΔA_c 4.3.3 (1) AN Altitude relative du lieu de construction = $A_c - A_m$ où :
 - A_c : Altitude du lieu de construction (référence 4.3.3 (1) AN)
 - A_m : Altitude moyenne locale = $(2*A_c + A_{N1} + A_{N2} + A_{E1} + A_{E2} + A_{S1} + A_{S2} + A_{O1} + A_{O2}) / 10$ (référence 4.3.3 (1) AN ; Hypothèse : absence d'obstacles bien individualisés) où les différentes A représentent les Altitudes des points situés à une distance de 500 m et de 1000 m du lieu de construction dans les 4 directions cardinales.
- z_e : Hauteur de référence z = Distance entre le niveau du sol le plus bas et celui du centre de la structure du tablier (en ne tenant pas compte des autres parties des aires de référence 8.3.1)
- z_0 : Longueur de rugosité (référence Tableau 4.1 AN ; Hypothèse : Catégorie de terrain IIIb (soit $z_0 = 0,5$ m et $z_{\min} = 9$ m)
- ❖ ρ : déjà défini
- ❖ v_m : Vent moyen $c_r(z)*c_0(z)*v_b$ (référence 4.3) où :
 - $c_r(z)$: Coefficient de rugosité = $k_r(z)*\ln(z/z_0)$ pour $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$
 $k_r(z)*\ln(z_{\min}/z_0)$ pour $z \leq z_{\min}$ (référence : 4.3.2) où :
 - $k_r(z)$: Facteur de terrain $0,19*(z_0/z_{0,II})^{0,07}$ (référence 4.3.2) où :
 - z_0 : déjà défini
 - $z_{0,II}$: z_0 correspondant à la catégorie de terrain II (réf 4.3.2) = 0,05 m
 - z_{\min} : Hauteur minimale (référence : Tableau 4.1 ; Voir z_0)
- q_b : Pression dynamique de référence $\frac{1}{2} * \rho * v_b^2$ (référence 4.5)

Le coefficient d'exposition c_e en catégorie de terrain IIIb (conditions des OANC de la Montagne) à la Réunion en l'absence d'obstacles bien individualisés, avec une altitude du lieu de construction avec un effet neutre et une hauteur de référence de 35 mètres vaut 2,27. Cela nous amène à $P_w/c_f = 1,61 \text{ kN/m}^2$ (valeur caractéristique : ELS ; $2,41 \text{ kN/m}^2$ à l'ELU). Pour mémoire, aux NV65, $P_w/c_f = 250/1,75 = 1,43 \text{ kN/m}^2$ à l'ELS et $2,50 \text{ kN/m}^2$ à l'ELU.

- $c_{f,x}$: Coefficient de force
 - $c_f = c_{f,x,0} * \text{maj} * \text{red}$ (référence 8.3.1)
 - ❖ maj : Augmenter $c_{f,x,0}$ de 3% par degré de pente transversale, sans dépasser 25% (référence : 8.3.1 (3))
 - ❖ red : Réduire $c_{f,x,0}$ de 0,5% par degré d'inclinaison, α_1 sur la verticale, sans dépasser 30% : (réf : 8.3.1 (2))
 - ❖ $c_{f,x,0}$: Coefficient de force sans écoulement de contournement aux extrémités (référence : 8.3.1 (1))



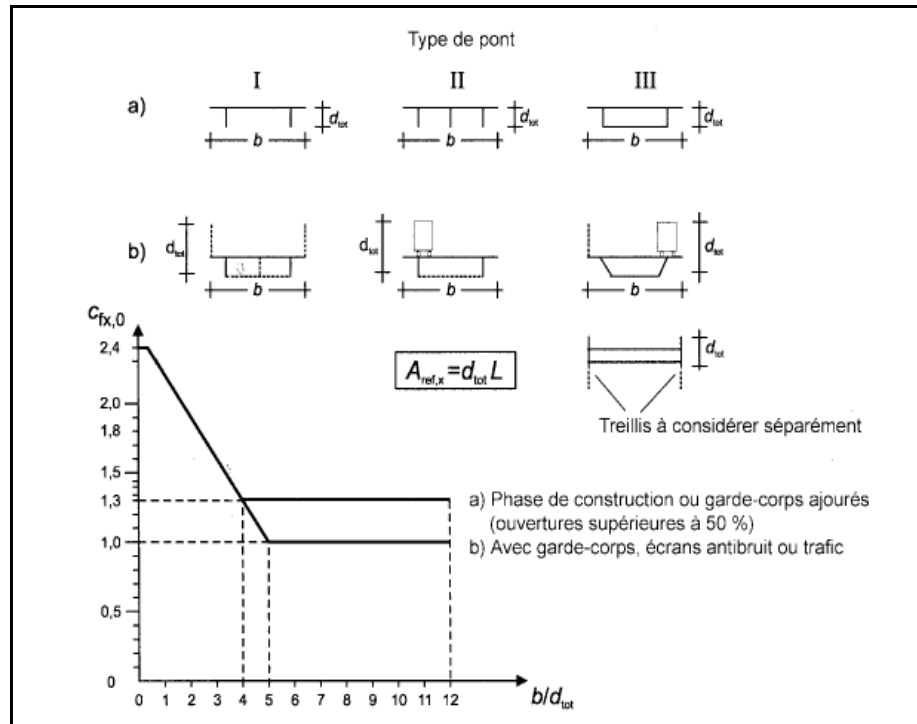


Tableau 1 : Coefficient de force applicable aux tabliers de pont sous l'action du vent

- $A_{ref,x}$: L'aire de référence sur laquelle la pression du vent est appliquée est la somme de la hauteur du caisson avec les surcharges permanents incluses plus une hauteur qui dépend du type de garde-corps et la présence de glissières ou barrières de sécurité.

En conclusion, si on considère que les coefficients maj et red se compensent, que la largeur du tablier est de 12 mètres et la hauteur de 4,5, on obtient, $c_f = 1,8$ en service et 2,05 en exploitation. La pression du vent est donc égale à $\frac{1}{2} * \rho * v_b^2 = 0,71 \text{ kN/m}^2$ fois un coefficient de force du vent. En phase d'exploitation, le coefficient de force du vent pour un tablier de pont avec les caractéristiques présentées vaut $C = 2,27 * 2,05 = 4,65$. La valeur caractéristique de la pression du vent vaut donc $3,30 \text{ kN/m}^2$. Cette valeur est seulement une référence. Nous avons rempli à chaque fois les différentes caractéristiques propres à chaque ouvrage. L'annexe 4 présente la feuille de calcul élaborée pour réaliser cette opération et comprendre le rôle que chacun des coefficients joue sur la force.

Il convient maintenant de voir comment le vent avait été considéré dans le dossier d'Avant Projet. A titre d'information, l'AVP indique les données suivantes de Météo France :

Site	Gillot - Aéroport	Montagne (Colorado)	Le Port
Vitesse maximale instantanée (m/s)	53	47*	50
Nombre de jours moyen avec rafales > 16 m/s	68	215	26.8
Nombre de jours moyen avec rafales > 28 m/s	0,5	14	0,8
Nombre de jours moyen avec rafales > 35 m/s	0,3	0,6	0,1

Tableau 2 : Caractéristiques du vent à La Réunion

* relevé de 2003 à 2006. La période de mesure est restreinte, c'est pourquoi la valeur peut paraître faible par rapport aux stations de Gillot et du Port.

Note : il est précisé que la station du COLORADO se trouve en site exposé, à une altitude de 742 m. L'altitude maximale du projet est de 250 m.

La vitesse de vent maximum vraisemblable pour la zone Sainte Marie – Saint Paul varie de 55 m/s à 80 m/s (Source : cartographie des vitesses extrêmes de vent dans les DOM - TOM). La particularité de l'île de la Réunion vis-à-vis du vent tient à ce qu'elle est soumise aux cyclones. Il est à noter que les vents cycloniques peuvent venir de toutes les directions, à la différence des alizés qui sont principalement parallèles à la cote sur le secteur d'étude.

Note : en cas de cyclone, une alerte rouge est déclenchée avec un préavis de 3 heures lorsque les conditions vont devenir cycloniques, c'est-à-dire lorsqu'un vent de 100 km/h et des rafales de 150 km/h vont être observées dans les prochaines heures. Chacun doit alors rejoindre son domicile et il n'est plus permis de circuler.

Le dimensionnement des OANC de la route des Tamarins et celui de la Rivière des Pluies incitent à placer les calculs de l'AVP dans des conditions plus défavorables que celles du fascicule 61 Titre I, et sa pression de vent de service de 2,50 kN/m² (correspondant à une vitesse de vent de 63 m/s).

L'AVP adopte donc les valeurs enveloppe de celles rencontrées sur les projets mentionnés précédemment :

- 300 kg/m² (69 m/s) pour l'ELS ;
- 400 kg/m² (80 m/s) pour l'ELU fondamental.

A titre de comparaison, la vitesse du vent ELS est nettement supérieure à celle établie à La Réunion pour une période de retour de 50 ans : 40,4 m/s = 145 km/h (Vent moyen sur 10 minutes à 10 m au dessus de la mer, CSTB, 1986). De même, la vitesse du vent ELU est la valeur supérieure des vents extrêmes vraisemblables.

Une première analyse critique de l'AVP nous amène à noter qu'à l'ELU la valeur du vent doit forcément être 1,5 fois la valeur à l'ELS. Une première correction doit donc être réalisée. De plus, la valeur trouvée à l'ELS s'inspire vraisemblablement des NV65. Nous proposons donc de retenir les valeurs de l'Eurocode, car elles nous paraissent plus précises et ces normes seront obligatoires dès 2010.

Actions d'origine thermique

On distingue deux types d'effets thermiques dont les valeurs caractéristiques sont définies ci-après : les variations uniformes et le gradient thermique.

Variations uniformes

Nous avons repris une note du SETRA du 20 septembre 2002 pour la route des Tamarins et nous avons ainsi retenu les valeurs suivantes pour la Réunion, hors structures hybrides :

T_{0-réf} : Température moyenne annuelle de l'air ambiant : 25°C

T_{max} : Température maximale annuelle de l'air ambiant : 35 °C

T_{\min} : Température minimale annuelle de l'air ambiant : 15°C

L'altitude augmente l'écart de température max et min, car elle minore T_{\max} de 1°C / 100m et T_{\min} de 0,5°C / 100m.

T_0 : Température initiale de l'ouvrage, température prévisible au moment où l'on bloque la libre dilatation d'un ouvrage. En pratique, T_0 peut être prise égale à $T_{0\text{-réf}}$: 25°C.

Pour le calcul structurel :

Dilatation : - Structure béton ou mixte acier /béton : $T_{\max} + 4^{\circ}\text{C} - T_0 = 14^{\circ}\text{C}$
- Structure métallique : $T_{\max} + 17^{\circ}\text{C} - T_0 = 27^{\circ}\text{C}$
Contraction : - Structure béton ou mixte acier / béton : $T_{\min} - T_0 = 10^{\circ}\text{C}$
- Structure métallique : $T_{\min} - T_0 = 10^{\circ}\text{C}$

Pour le calcul et réglage des joints de chaussée et des appareils d'appuis :

Dilatation : - Structure béton ou mixte acier / béton : $T_{\max} + 4^{\circ}\text{C} - T_0 + 10^{\circ}\text{C} = 24^{\circ}\text{C}$
- Structure métallique : $T_{\max} + 17^{\circ}\text{C} - T_0 + 10^{\circ}\text{C} = 37^{\circ}\text{C}$
Contraction : - Structure béton ou mixte acier / béton : $T_{\min} - T_0 + 10^{\circ}\text{C} = 20^{\circ}\text{C}$
- Structure métallique : $T_{\min} - T_0 + 10^{\circ}\text{C} = 20^{\circ}\text{C}$

Gradient thermique

Les effets du gradient thermique sont calculés en admettant une variation linéaire équivalente sur toute la hauteur du tablier. La valeur caractéristique du gradient thermique entre les fibres extrêmes supérieure et inférieure du tablier est de 15°C. Il est pris en compte un gradient thermique transversal (correspondant à l'action du soleil au crépuscule) de 5°C.

Séisme

L'Ile de La Réunion a été récemment classée comme une zone à faible sismicité. Dans ce sens, il nous a fallu évaluer le comportement des ouvrages d'art sous l'action sismique afin de conclure si celle-ci a un caractère dimensionnant ou pas. Nous avons évalué le spectre de réponse élastique horizontal et celui de réponse élastique vertical en fonction de l'accélération de calcul a_g et a_{gv} respectivement ainsi qu'en fonction de la classe de sol. Le détail de nos calculs sort de l'objet de notre étude mais le résultat il est bien important : la situation de projet accidentelle que représente un séisme ne dimensionne pas l'ensemble des ouvrages d'art non courants du secteur de la Montagne du projet de tram-train à l'Ile de La Réunion.

Dénivellement d'appui

Le tassement différentiel des fondations est introduit dans le calcul de tablier sous forme d'une dénivellation d'une ligne d'appui. Il s'agit d'une action permanente à introduire dans les combinaisons d'actions pour les vérifications d'état limite ultime et de service de la structure. Un tassement différentiel de 20 mm est introduit indépendamment dans les calculs pour chacun des appuis. Quand l'ouvrage n'est pas encasté il convient aussi d'introduire un déplacement vertical de 10 mm indépendant pour chacun des appuis afin de représenter un éventuel vérinage du tablier.

Retrait et fluage

Le retrait et le fluage sont pris en compte par le logiciel de calcul de structures Pythagore. Le principe général est que le retrait dépend du temps écoulé depuis le coulage de l'élément, alors que le fluage est lié au temps écoulé depuis la mise en charge de chaque effort. Toutefois, le calcul réalisé par Pythagore part du principe d'une loi de fluage constante sur l'intervalle de temps considéré. Pour que cette approximation soit valide, il importe que le pas de temps ne soit pas trop important. Ceci est moins vrai pour le fluage « à l'infini ».

Combinaisons de calcul

D'après la norme EN 1991-2, la simultanée des systèmes de chargement ferroviaires définis précédemment peut être prise en compte en considérant les groupes de charges qui sont définis dans le tableau ci-dessous. Il convient d'appliquer chaque groupe de charges comme une action variable unique, c'est-à-dire que l'on considère séparément chacun d'entre eux comme définissant une action caractéristique variable unique à combiner avec des charges autres que celles de trafic.

Groupes de charges de trafic ferroviaire – valeur caractéristique											
Nombre de voies sur ouvrages			Groupe de charges			Forces verticales		Forces horizontales			Remarques
			Réf EN 1991-2								
1	2	≥3	Nombre de voies chargées	Groupe de charge	Voie chargée	LM71 ¹	Train à vide	Accélération freinage ¹	Force centrifuge ¹	Effort de lacet ¹	
			1	Gr11	T1	1		1	0,5	0,5	Max vertical et max longitudinal
			1	Gr12	T1	1		0,5	1	1	Max vertical et max transversal
			1	Gr13	T1	1 ²		1	0,5	0,5	Max longitudinal
			1	Gr14	T1	1 ²		0,5	1	1	Max latéral
			1	Gr15	T1		1		1	1	Stabilité latérale avec train à vide
			2	Gr21	T1	1		1	0,5	0,5	Max vertical et max longitudinal
					T2	1		1	0,5	0,5	
			2	Gr22	T1	1		0,5	1	1	Max vertical et max transversal
					T2	1		0,5	1	1	
			2	Gr23	T1	1		1	0,5	0,5	Max longitudinal
					T2	1		1	0,5	0,5	
			2	Gr24	T1	1		0,5	1	1	Max latéral
					T2	1		0,5	1	1	
			≥3	Gr31	Ti	0,75		0,75	0,75	0,75	Cas de charge supplémentaire

Tableau 3 : Groupes de charges de trafic ferroviaire

¹ Tous les coefficients appropriés (α , ϕ , f , ...) doivent être pris en compte

² Le coefficient peut être réduit à 0,5 si l'effet est favorable ; il ne peut être égal à 0

	Action composante dominante selon les cas
	Dans les cas favorables, ces valeurs non dominantes peuvent être prises égales à 0
	A considérer lors du calcul d'une structure supportant une voie
	A considérer lors du calcul d'une structure supportant deux voies. Chacune des deux voies doit être considérée comme T1 (voie 1) ou T2 (voie2)
	A considérer lors du calcul d'une structure supportant trois voies ou plus. Chaque voie doit être considérée tour à tour comme T1, n'importe quelle autre tour à tour comme T2, les autres étant considérées comme non chargées. En outre le groupe de charge 31 doit être considéré comme un cas de charge supplémentaire dans lequel toutes les longueurs défavorables de la voie T_i sont chargées

Q_F : Actions dues aux charges ferroviaires, valeur caractéristique

Q_{FFREQ} : Actions dues aux charges ferroviaires, valeur fréquente. Lorsque des groupes de charges sont pris en compte, il convient d'affecter, pour chaque groupe, les coefficients du tableau précédent aux valeurs fréquentes des actions correspondantes considérées dans le groupe.

Il convient de prendre les actions quasi-permanentes de trafic égales à zéro.

T : Action enveloppe des actions dues à la température (uniforme T_{unif} ou gradient GR). T vaut la plus défavorable des deux combinaisons suivantes :

$$T_{unif} + 0,75 GR \text{ ou } GR + 0,35 T_{unif}$$

D : Action des tassements d'appui en construction et en service

W_s : Actions dues aux effets du vent en service (vent cyclonique)

W_{Ex} : Actions dues aux effets du vent en service avec exploitation ferroviaire

Les combinaisons en service pour un pont rail s'écrivent de la façon suivante :

Etat Limite de Service (ELS) quasi-permanent :

$$P + G_{max} + G_{min} + D + 0,5 T$$

Etat Limite de Service (ELS) fréquents :

$$P + G_{max} + G_{min} + D + Q_{FFREQ} + 0,5 T$$

soit

$$P + G_{max} + G_{min} + D + \begin{cases} (0,8 Gr11) & + 0,5 T \\ (0,8 Gr12) & + 0,5 T \\ (0,8 Gr13) & + 0,5 T \\ (0,8 Gr14) & + 0,5 T \\ (0,8 Gr15) & + 0,5 T \\ (0,7 Gr21) & + 0,5 T \\ (0,7 Gr22) & + 0,5 T \\ (0,7 Gr23) & + 0,5 T \\ (0,7 Gr24) & + 0,5 T \\ (0,6 Gr31) & + 0,5 T \end{cases}$$

$$P + G_{max} + G_{min} + D + 0,6 T$$

$$P + G_{max} + G_{min} + D + 0,2 W_s$$

Etat Limite de Service (ELS) caractéristiques :

$$P + G_{max} + G_{min} + D + 0,6 T + Q_F$$

$$P + G_{\max} + G_{\min} + D + 0,6 W_{\text{Ex}} + Q_{\text{F}}$$

soit

$$P + G_{\max} + G_{\min} + D + (0,6 T \text{ ou } 0,6 W_{\text{Ex}}) + \left| \begin{array}{l} \text{Gr11} \\ \text{Gr12} \\ \text{Gr13} \\ \text{Gr14} \\ \text{Gr15} \\ \text{Gr21} \\ \text{Gr22} \\ \text{Gr23} \\ \text{Gr24} \\ \text{Gr31} \end{array} \right.$$

$$P + G_{\max} + G_{\min} + D + W_{\text{S}}$$

$$P + G_{\max} + G_{\min} + D + T + Q_{\text{FFREQ}}$$

soit

$$P + G_{\max} + G_{\min} + D + T + \left| \begin{array}{l} (0,8 \text{ Gr11}) \\ (0,8 \text{ Gr12}) \\ (0,8 \text{ Gr13}) \\ (0,8 \text{ Gr14}) \\ (0,8 \text{ Gr15}) \\ (0,7 \text{ Gr21}) \\ (0,7 \text{ Gr22}) \\ (0,7 \text{ Gr23}) \\ (0,7 \text{ Gr24}) \\ (0,6 \text{ Gr31}) \end{array} \right.$$

Etat Limite Ultime (ELU) fondamentaux :

$$P + 1,35 G_{\max} + G_{\min} + D + (1,45 \text{ ou } 0) Q_{\text{F}} + (0 \text{ ou } 0,9) W_{\text{Ex}}$$

$$P + 1,35 G_{\max} + G_{\min} + D + (1,45 \text{ ou } 0) Q_{\text{F}} + (0 \text{ ou } 0,9) T$$

$$P + 1,35 G_{\max} + G_{\min} + D + (1,5 \text{ ou } 0) W_{\text{S}}$$

$$P + 1,35 G_{\max} + G_{\min} + D + (1,5 \text{ ou } 0) T + (1,45 \text{ ou } 0) \times 0,8 \times Q_{\text{F}}$$

Etat Limite Ultime (ELU) accidentel:

$$P + G_{\max} + G_{\min} + D + CH + (1 \text{ ou } 0) Q_{\text{FFREQ}}$$