



# COMPORTEMENT AU VENT DES PONTS : COMPARAISON DES REGLEMENTS DE CALCUL ADOPTES AU MAROC ETUDE DE CAS DU PONT A HAUBANS DE SIDI MAAROUF

Par: CHAFIKI Taoufik

Ecole Hassania des Travaux Publics

Direction des Etudes, du Développement et de la  
Recherche Routière, Rabat

17 & 18/10/2022

- **1.Introduction**
- **2.Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts**
- **3.Application de l'EN 1991-1-4 au contexte marocain**
- **4.Etude de cas du tablier du pont à haubans de Sidi Maarouf**
- **5.Conclusion**



# Objectif de l'article

- Présenter les hypothèses et les bases de calcul du vent selon les règlements adoptés au Maroc;
- Mener une analyse critique et comparative des actions du vent calculées par ces règlements ;
- Proposer la démarche à suivre pour assurer la cohérence entre l'EC1-Partie 1.4 et le CPC marocain, présentant la carte du vent adoptée au Maroc, complété par le NV65;
- Présenter une étude de cas du pont à haubans de Sidi Maarouf avec interprétations et commentaires des résultats des différents règlements.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 1.Fascicule 61 titre II

Le Fascicule 61 titre II du CPC admet, pour évaluer l'action du vent sur les ponts en service, les hypothèses simplificatrices suivantes : Le vent souffle horizontalement dans une direction normale à l'axe longitudinal de la chaussée. Il développe sur toute surface frappée normalement une pression de 2.000 newtons par mètre carré (N/m<sup>2</sup>).

Ainsi, le F61 titre II définit une valeur forfaitaire à appliquer sur tous les ponts sans tenir compte ni leurs situations ni leurs conditions d'environnement.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

Les règles NV65 définissent la pression élémentaire s'exerçant sur l'une des faces d'un élément de parois par la formule :

$$q_c = q_{10} \times K_m \times K_s \times K_h \times \delta \times \beta$$

Avec :	<b>q<sub>10</sub></b>	pression dynamique de base mesurée à 10 m de hauteur ;
	<b>K<sub>h</sub></b>	coefficient qui tient compte de l'effet de hauteur ;
	<b>K<sub>s</sub></b>	coefficient caractérisant l'effet du site ;
	<b>K<sub>m</sub></b>	coefficient de masque ;
	<b>δ</b>	coefficient de réduction des pressions dynamiques ;
	<b>β</b>	coefficient de majoration dynamique.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

Les règles NV65 définissent la pression élémentaire s'exerçant sur l'une des faces d'un élément de parois par la formule:

$$q_c = q_{10} \times K_m \times K_s \times K_h \times \delta \times \beta$$

Avec :	<b>q<sub>10</sub></b>	pression dynamique de base mesurée à 10 m de hauteur ;
	<b>K<sub>h</sub></b>	coefficient qui tient compte de l'effet de hauteur ;
	<b>K<sub>s</sub></b>	coefficient caractérisant l'effet du site ;
	<b>K<sub>m</sub></b>	coefficient de masque ;
	<b>δ</b>	coefficient de réduction des pressions dynamiques ;
	<b>β</b>	coefficient de majoration dynamique.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

### Pression dynamique de base $q_{10}$ :

C'est la pression dynamique de base normale (ou extrême) exercée à une hauteur de 10 m au-dessus du sol, pour un site normal, sans effet de masque sur un élément dont la plus grande dimension est égale à 0,50 m. Le tableau suivant donne les valeurs des pressions dynamiques de base normales et extrêmes en fonction des différentes régions indiquées selon la répartition de la carte du Maroc .

Région	Pression dynamique de base [daN/m <sup>2</sup> ]	Pression dynamique extrême de base [daN/m <sup>2</sup> ]
Région 1	53,5	93,3
Région 2	68	119
Région 3	135	236

Le rapport entre les pressions extrême et normale est 1.75.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

### Effet de hauteur $K_h$ :

La pression dynamique de base est celle régnant à 10m au-dessus du sol, notée  $q_{10}$ . Pour H compris entre 0 et 500 m,  $q_h$  est donné en fonction de  $q_{10}$  par la formule :

$$q_h = 2.5 \times \frac{H + 18}{H + 60} = K_h \times q_{10}$$

H désigne la hauteur de chaque étage par rapport au sol.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

### Effet de site $K_s$ :

Le coefficient de site est un coefficient d'augmentation pour les sites exposés, comme le bord de la mer, et de réduction pour les sites protégés comme à l'intérieur d'une forêt dense.

Les valeurs du coefficient du site sont données sur le tableau

Région	III	II	I
Site protégé	0.8	0.8	0.8
Site normal	1	1	1
Site exposé	1.25	1.3	1.35

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

### Effet du masque $K_m$ :

Il y a effet de masque lorsque la construction envisagée est masquée et protégée partiellement ou totalement par d'autres constructions de grande probabilité de durée.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

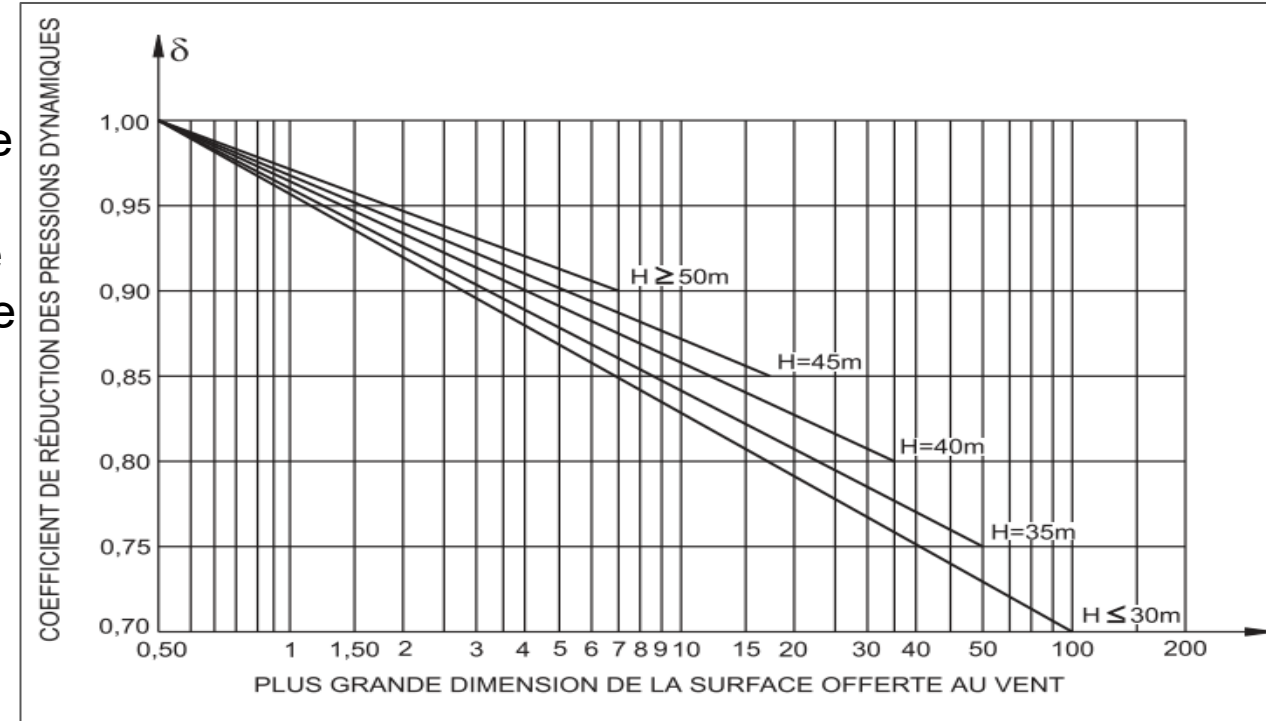
## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

### Effet de dimension $\delta$ :

Le vent est irrégulier, surtout au voisinage du sol, et ne souffle pas avec la même vigueur simultanément en tout point d'une même surface ; la pression moyenne diminue ainsi quand la surface frappée augmente.

Les pressions dynamiques exercées sur les éléments de la construction sont réduites d'un coefficient  $\delta$  fonction de la plus grande dimension (horizontale ou verticale) de la surface offerte au vent, et de la cote H du point le plus haut de cette surface.

Le coefficient  $\delta$  est donné par l'abaque de la figure



# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

### Coefficient de majoration dynamique

Aux effets statiques calculés précédemment, s'ajoutent les effets dynamiques qui dépendent des caractéristiques mécaniques et aérodynamiques de la construction.

Pour tenir compte de l'effet produit par une succession de rafales de vent, on multiplie les pressions trouvées par un coefficient majorant  $\beta$  donné par la formule :

$$\beta = \theta(1 + \xi \times \tau)$$

$\tau$  : coefficient de pulsation déterminé en fonction de la cote H ;

$\xi$  : coefficient de réponse, donné en fonction de la période T;

$\theta$  : coefficient global dépendant du type de la construction.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 2. Règles Neige et Vent 65 et carte du vent marocaine

L'effort de traînée est donné par la formule :

$$Tr = C_t \times q_c \times A$$

Avec :

$q_c$  : La pression dynamique corrigée calculée précédemment.

$A$  : L'aire de la surface frappée ;

$C_t$  : Le Coefficient de traînée dépendant du type, de la forme et de l'élançement de la structure,

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 3. Eurocode 1, Partie 1-4

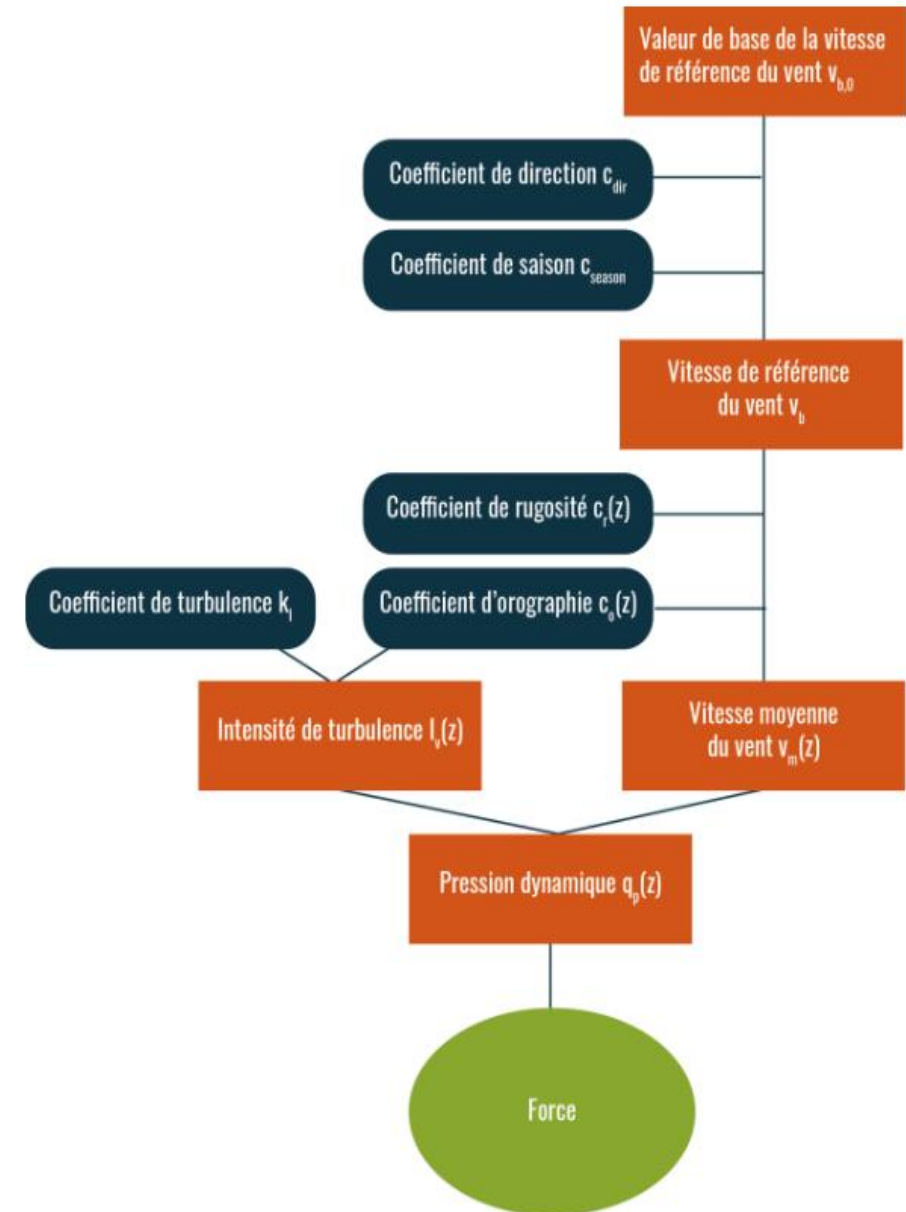
La détermination des efforts dus au vent sur les ouvrages se fait en trois étapes :

Détermination de la vitesse moyenne du vent au niveau de l'ouvrage tenant compte sa localisation, des conditions de site, de la rugosité..... ;

Détermination de la pression de pointe perpendiculairement à la direction du vent tenant compte la vitesse moyenne du vent et sa partie fluctuante ;

Détermination des efforts exercés sur l'ouvrage en tenant compte de sa forme, de sa réponse dynamique et de ses dimensions.

La procédure de calcul est schématisée sur la



# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 3. Eurocode 1, Partie 1-4

### Valeur de base de la vitesse de référence $V_{b,0}$

Cette vitesse de référence est une vitesse moyenne (moyenne sur 10 minutes), supposée mesurée à 10 m de hauteur, en site plat et peu rugueux (catégorie II). Elle correspond à une tempête dont la probabilité annuelle d'occurrence est égale à 0,02 (tempête dite «cinquantennale»). En Europe, chaque pays a établi, dans son Annexe Nationale, la carte de zonage permettant de déterminer cette valeur en fonction de la localisation de l'ouvrage, et ce en se basant sur le traitement statistique des données disponibles dans les stations météorologiques. Au Maroc, cette donnée n'est pas encore disponible. Une méthodologie est proposée pour l'estimer en fonction des données déjà disponibles.

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 3. Eurocode 1, Partie 1-4

### Vitesse de référence $V_b$

La valeur de de la vitesse de base est ensuite modifiée pour obtenir la vitesse de référence en utilisant la formule suivante :

$$V_b = C_{prob} \cdot C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b0}$$

Avec :  $C_{prob}$  : Coefficient qui tient compte de la période de retour

$C_{dir}$  : Coefficient de direction qui tient compte de l'orientation de élément par rapport au vent dominant ;

$C_{season}$  : Coefficient de saison qui tient compte de la durée de vie (applicable uniquement pour les phases de durées inférieures à trois mois).

Durée de la phase	Période de retour de l'action climatique	$C_{prob}$
$\leq 3$ jours	2 ans	0,82
$\leq 3$ mois (mais $>3$ jours)	5 ans	0,88
$\leq 1$ an (mais $>3$ mois)	10 ans	0,92
$> 1$ an	50 ans	1,00

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 3.Eurocode 1, Partie 1-4

### Vitesse de moyenne $V_m$

Connaissant la vitesse de référence et la rugosité du terrain, on peut calculer la vitesse moyenne par l'équation :

$$V_m = C_r(z) \cdot C_o(z) \cdot V_b$$

Avec :  $C_r$  : Coefficient de rugosité qui décrit le profil logarithmique de la variation de la vitesse en fonction de l'altitude et de la catégorie du terrain;

$C_o$  : Coefficient d'orographie qui tient compte de la topographie du terrain environnant : pente du terrain naturel, présence d'obstacles isolés ou répartis,...

Le coefficient  $C_r$  est donné par la formule suivante :

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{\max(z, z_{rmin})}{z_0}\right)$$

Catégorie de terrain	$c_r(z = 10m)$
0	1,23
II	1,00
IIIa	0,82
IIIb	0,67
IV	0,63 (valeur calculée avec $z = z_{min} = 15 m$ )

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

## 3. Eurocode 1, Partie 1-4

### Pression de pointe

Le passage de la vitesse moyenne à la pression de pointe se passe par l'équation

$$q_p(z) = (1 + 7I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m(z)^2$$

Avec  $I_v$  : Intensité de turbulence qui caractérise la partie fluctuante du vent autour de la valeur moyenne. Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_v(z) = \frac{1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6}{\ln\left(\frac{\max(z, z_{\min})}{z_0}\right)}$$

# Hypothèses et bases de calcul du vent sur les ponts

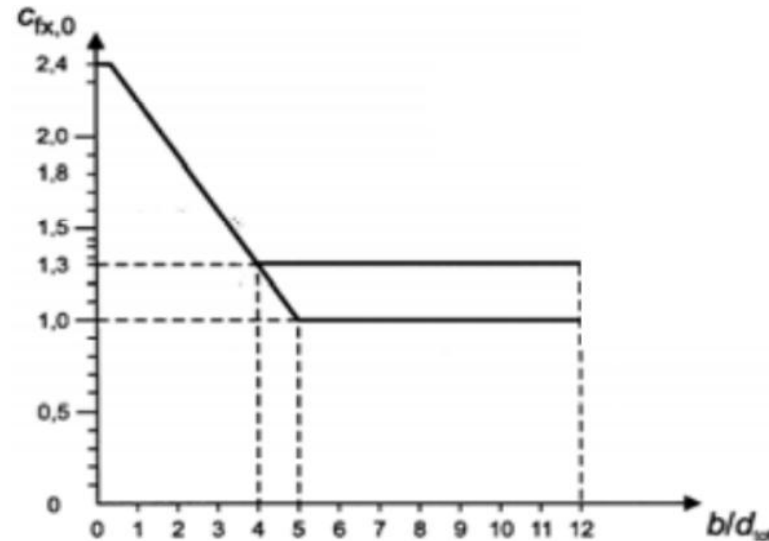
## 3. Eurocode 1, Partie 1-4

### Effort de traînée

L'effort du vent exercé par le vent sur l'élément de la structure est donné par la formule :

$$F_w = C_s C_d \cdot C_{fx,0} \cdot q_p(z) \cdot A_{ref}$$

Avec :  $A_{ref}$  : Aire de référence de l'élément de structure considéré ;  
 $C_{fx,0}$  : Coefficient de traînée qui dépend de la forme et de l'élançement de l'élément de structure considéré ;  
 $C_s C_d$  : Coefficient structural qui caractérise l'amplification dynamique de la réponse dans le sens du vent.



# Application de l'EN 1991-1-4 au contexte marocain

## 1. Problématique

L'utilisation de l'EN 1991-1-4 pour le dimensionnement des ouvrages au Maroc nécessite l'établissement d'une Annexe Nationale conforme à l'Eurocode. Le CPC marocain, qui définit les valeurs des vitesses du vent à adopter pour le dimensionnement des ouvrages a été établi conformément au NV65.

Les pressions dynamiques de référence de l'EN 1991-1-4 et de «base» des Règles NV65 diffèrent profondément par leur définition : la référence des Règles NV65 correspond à une vitesse de pointe alors que la vitesse de référence de l'EN 1991-1-4 correspond à une vitesse moyenne sur 10 minutes.

L'EN 1991-1-4 et les Règles NV65 diffèrent également par la définition même de l'événement météorologique considéré.

L'EN 1991-1-4 considère la tempête «cinquantennale». Les Règles NV65 définissent le vent «normal» à partir d'une statistique des vitesses maximales journalières; mais, du fait de l'existence d'une autocorrélation importante de cette série des vitesses journalières, il n'est pas possible de relier simplement le vent «normal» des NV65 et le vent de référence de l'EN 1991-1-4. Quant au vent «extrême» des Règles NV 65, bien qu'il paraisse défini dans le commentaire C 1,231 de ces règles, il ne l'est pas en réalité car personne n'est capable de donner une valeur numérique à une vitesse définie comme...«la plus grande vitesse instantanée à laquelle la construction peut être soumise durant sa vie normale»

Ainsi, une approche doit être élaborée pour établir la corrélation entre les vitesses de base définies dans le NV65 avec les vitesses de référence définies dans l'EN 1991-1-4. Le paragraphe suivant détaille l'approche de calcul proposée.

# Application de l'EN 1991-1-4 au contexte marocain

## 2. Démarche à suivre

Actuellement, dans les vérifications aux E.L.U. (selon BAEL 91 par exemple), les actions «normales» des NV65 sont d'abord multipliées par 1,2 pour les transformer en actions «nominales», puis pondérées par le coefficient 1,5, soit au total un coefficient multiplicateur de  $1,2 \times 1,5 = 1,8$ , valeur très proche du rapport 1,75 entre les actions «extrêmes» des NV65 et les actions «normales». En d'autres termes, les vérifications aux E.L.U. sont faites avec le vent «extrême» des NV65 sans pondération.

Autrement dit, le vent «extrême» des Règles NV65 correspond à une tempête d'une sévérité à peine supérieure à celle de la tempête «cinquantennale» de l'EN 1991-1-4. Mais les actions de ce vent «extrême» entrent dans les vérifications aux E.L.U. sans majoration, alors que celles de l'EN 1991-1-4 y sont pondérées par le coefficient 1,5. En conséquence pour un même chargement à l'état limite ultime entre le NV65 et l'EN 1991-1-4, la vitesse de pointe du vent correspondant à l'état limite de service selon l'Eurocode est liée à la vitesse de base normale du NV65 par la formule :

$$v_{pointe}(EC1) = \sqrt{\frac{1.75}{1.5}} v_b(NV65)$$

Finalemment :

$$v_{b,0}(EC1) = \sqrt{\frac{1.75}{1.5}} \frac{1}{1.53} v_b(NV65) = 0.71 v_b(NV65)$$

# Application de l'EN 1991-1-4 au contexte marocain

## 2. Démarche à suivre

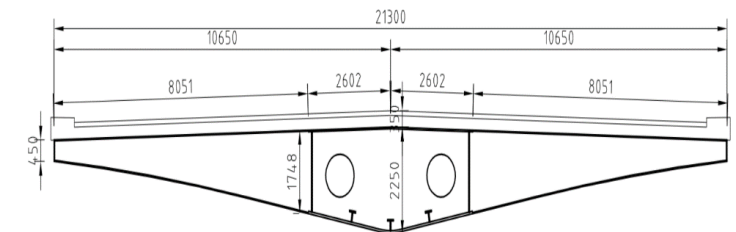
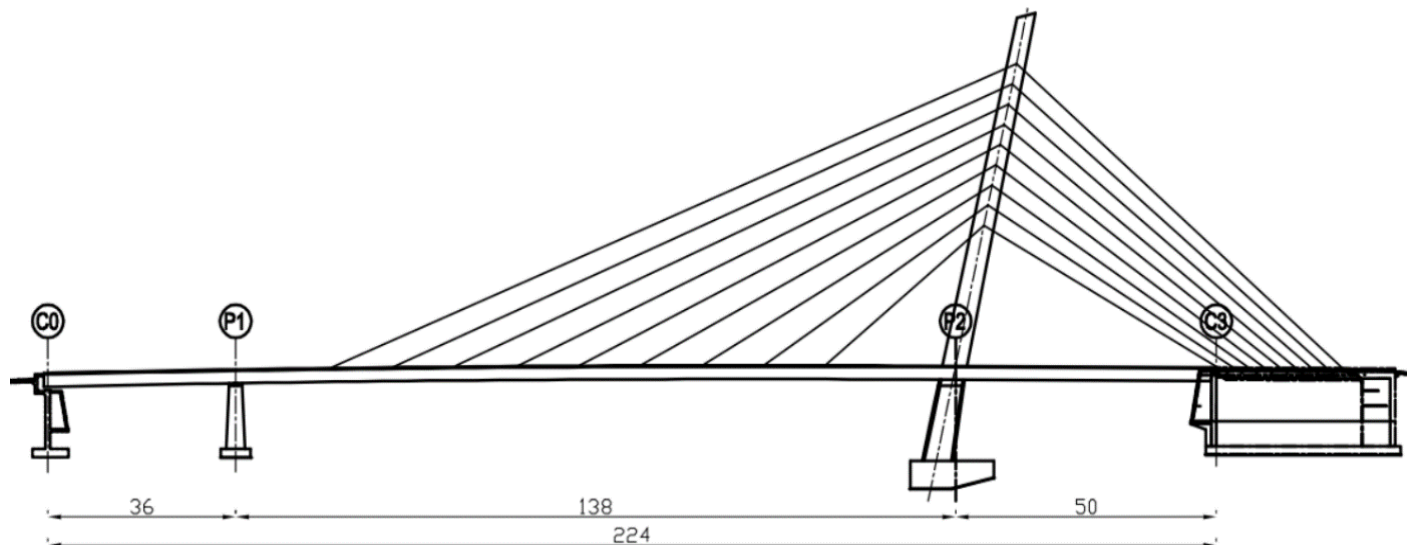
On en déduit finalement le tableau des valeurs de base de la vitesse référence conformément à l'EC1-1-4, à partir du tableau des valeurs des vitesses de base du NV65 :

Région	NV65		EC1-1-4	
	Vitesse de base normale [m/s]	Pression normale [KN/m <sup>2</sup> ]	Valeur de base de la vitesse de référence [m/s]	Pression de référence (EC1-1-4) [KN/m <sup>2</sup> ]
Région 1	29.48	0.53	20.93	0.27
Région 2	33.26	0.68	23.61	0.34
Région 3	46.87	1.35	33.27	0.68

# Etude de cas du tablier du pont à haubans de Sidi Maarouf

## 1. Présentation du pont

Le pont de Sidi Maârouf à Casablanca est un pont à haubans de longueur totale 224 m, répartie en trois travées : 36 m – 138 m – 50 m. Le tablier du pont est de type mixte constitué d'un caisson métallique avec des entretoises et pièces de pont supportant un hourdis en béton armé. Le pylône central en béton armé supporte 27 haubans : 9 pour la travée principale de 138 m et 9 paires qui viennent l'équilibrer par ancrage dans la culée C3.



# Etude de cas du tablier du pont à haubans de Sidi Maarouf

## *2. Calcul du vent selon le Fascicule 61 titre II*

La pression appliquée par le vent sur le tablier du pont est égale à  $2 \text{ KN/m}^2$  ;  
L'effort horizontal linéique ainsi appliqué sur le tablier est  $4.5 \text{ KN/m}$ .

# Etude de cas du tablier du pont à haubans de Sidi Maarouf

## 3. Calcul du vent selon le CPC marocain et NV65

Pression dynamique corrigée

$q_{10}$ (daN/m <sup>2</sup> )	$K_m$	$K_s$	$K_h$	$\delta$	$\beta$	$q_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
53.5	1	1	1.03	0.7	1.06	0.41

Effort de trainée  $T_r$  et force de portance  $L$ :

- Pour le calcul de l'effort de trainée (effort horizontal agissant sur la surface verticale du tablier, la détermination du coefficient de trainée  $C_t$  est faite en assimilant le tablier à un panneau plein au sens du NV65.
- Pour le calcul de la force de portance (effort vertical agissant sur la surface de l'intrados du tablier, la détermination du coefficient portance  $CL$  est faite en assimilant le tablier à une toiture isolée au sens du NV65.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

<b>Coefficient</b>	<b><math>C_t</math></b>	<b>1.84</b>	<b><math>CL</math></b>	<b>0.7</b>
<b>Surface frappée (m<sup>2</sup>/m)</b>	$h$	3.25	$b$	21.5
<b>Force (KN/m)</b>	$T_r$	2.44	$L$	6.17

# Etude de cas du tablier du pont à haubans de Sidi Maarouf

## 4. Calcul du vent selon l'EN 1991-1-4

Pression de pointe :

$v_{b,0}$ (m/s)	$C_{prob}$	$C_{dir}$	$C_{sea}$	$v_{b,0}$ (m/s)	$q_b$ (kN/m <sup>2</sup> )	$C_r$	$C_o$	$V_m$ (m/s)	$q_p$ (kN/m <sup>2</sup> )
20.93	1	1	1	20.93	0.27	0.78	1	18.4	0.46

Effort de trainée  $T_r$  et force de portance  $L$ :

Coefficient	$C_{fx}$	1.14	$C_{fy}$	0.9
Surface frappée (m <sup>2</sup> /m)	$A_{ref}$	6.3	$b$	21.5
Force (KN/m)	$T_r$	4.00	$L$	8.98







# Conclusion

Dans ce travail, les hypothèses et les bases de calcul du vent selon le F61 titre II, le NV65 et l'EC1-1-4 ont été présentées. Une démarche à suivre pour assurer l'application de l'EC1-1-4, en utilisant les données disponibles sur la carte du vent marocaine, a été proposée en se basant sur le principe d'équivalence des états limites ultimes entre l'EC1-1-4 et le NV65. Une étude de cas sur le tablier d'un pont a été ensuite présentée. Enfin, les résultats des différents règlements ont été comparés et commentés.

# Références

- [1] CPC\_FRANCAIS, Fascicule n° 61 conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art titre II. - programmes de charges et épreuves des ponts-routes, 1980.
- [2] CSTB, Règles NV65 :Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes, 2009.
- [3] CPC\_MAROCAIN, Cahier des prescriptions communes applicables au calcul des surcharges dues au vent.
- [4] CEN, Eurocode 1 : Actions sur les structures.Partie 1-4 : Actions générales - Actions du vent, 2005.
- [5] J. Biétry, L'Eurocode 1 partie 2.4 «Actions du Vent» présentation et éléments de comparaison avec les règles NV 65, 1999.
- [6] SETRA, Eurocodes 0 et 1: Application au ponts route et passerelles, 2010.



11<sup>ème</sup> المؤتمر الوطني للطرق  
ⵓ ⵏ ⵙⴰⵎⴰⵎⴰ ⵏ ⵓⵎⵓⵔ ⵏ ⵓⵎⵓⵔ  
Congrès National de la Route

MERCI

SOUS LE THÈME

Quels rôles de l'infrastructure  
routière dans le nouveau modèle  
de développement économique  
et social du Maroc ?

تحت شعار

أية مكانة لتطوير البنية التحتية  
الطرقية في تنزيل النموذج  
الجديد للتنمية الاقتصادية  
و الاجتماعية بالمغرب ؟

10 / 12  
نوفبر NOV  
DAKHLA 2022

الداخلة  
DAKHLA