

SIGNALISATION VERTICALE : AMÉLIORATION DE LA RÉSISTANCE AU VENT

J. BERTHELLEMY

Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art, Sétra, France.

direction.setra@equipement.gouv.fr

RÉSUMÉ

Les structures porteuses de signalisation verticale ont subi des dégâts importants lors des tempêtes qui ont traversé la France en janvier 1998, puis surtout en décembre 1999. Les quelques structures anciennes comportant déjà des points faibles, comme des fissures de fatigue, ont été naturellement sélectionnées et démolies par le vent dans ces circonstances.

La défaillance d'une structure de signalisation verticale peut avoir des conséquences graves pour les usagers, car l'objet peut encore provoquer des accidents après sa chute. Parallèlement, la densité du réseau routier se stabilise, de sorte que la durée de vie souhaitable dans le cas d'une structure porteuse de signalisation verticale est passée, en une décennie, de 15 ans à 30 ans environ. Il a donc été décidé de faire évoluer la norme française [11] pour viser un renforcement des structures neuves.

L'introduction des eurocodes permet de compléter cette évolution en introduisant notamment la justification des structures vis-à-vis de la fatigue causée par le vent.

La maintenance et la surveillance des structures porteuses de signalisation verticale sont des préoccupations fortes des gestionnaires routiers. Ces thèmes ont fait l'objet de la publication d'un guide technique des inspections à mener. [7]

Enfin, des chantiers expérimentaux sont engagés avec l'objectif de réaliser quelques structures robustes, comportant notamment des montants redondants.

1. PROBLÈMES QUE SOULÈVE LA MAINTENANCE DES OUVRAGES DE SIGNALISATION VERTICALE.

Les structures porteuses de signalisation verticale, Portiques Potences et Hauts Mâts (PPHM) peuvent atteindre des dimensions importantes : plusieurs dizaines de mètres pour les portiques, quinze mètres de volée pour les potences. Elles sont principalement soumises aux effets du vent. Elles portent généralement des panneaux, et parfois des équipements plus lourds : les panneaux à message variable (PMV).

Le parc français est estimé aujourd'hui à environ 15 000 unités. Sur les routes nationales, les PPHM ne sont pas considérés comme des ouvrages d'art, mais comme des équipements de la route et leur entretien ne correspond généralement pas à une ligne budgétaire spécifique.

Le système des garanties diffère également de celui des ouvrages d'art. Il n'existe pas de garantie décennale, du fait de l'absence de jurisprudence, mais seulement une responsabilité décennale du constructeur. La norme XP P 98-550 [11], bien que ce ne soit pas à ce type de texte de prendre position sur cette question, limite à titre informatif la responsabilité du constructeur à une garantie d'une année seulement, sauf si l'entretien est mené selon des critères très exigeants.

Cependant, la gestion des PPHM soulève les mêmes questions techniques que celle des ouvrages d'art, à savoir :

- Quel est mon patrimoine ?
- Dans quel état est-il ?
- Comment puis-je pérenniser mon parc d'ouvrages ?
- Combien cela va-t-il coûter ?

Le recensement et l'évaluation systématique des structures sont en phase de généralisation. Mais il n'y a pas encore en France de système de collecte de toutes les données pour ces structures. La pathologie recensée fait état de pas moins de 71 types de dégradations différents, pouvant affecter les diverses parties des PPHM, à des fréquences et degrés de gravité plus ou moins élevés.

Par ailleurs, le rythme de la construction de nouvelles routes se ralentit du fait de la maturité et de la densité du réseau routier national. La densité du réseau routier se stabilise, les nouvelles routes et les transformations d'échangeurs sont plus rares, de sorte que l'on estime que la durée de vie fonctionnelle souhaitable d'un ouvrage de signalisation serait passée en une décennie, de 15 ans à 30 ans environ.

De plus, les enjeux tant économiques que juridiques induits par une maintenance insuffisante peuvent s'avérer très importants. En terme de viabilité, la chute d'un PPHM ne peut certes pas être comparée à l'écroulement d'un pont, car dans le cas du PPHM, il est facile de dégager la route et de rétablir la circulation. Cependant, l'incidence financière totale qu'aurait par exemple la chute d'un portique sur une autoroute de liaison, en intégrant notamment le coût des victimes, est estimée à 12 fois la valeur de remplacement à neuf de l'ouvrage. Par ailleurs, cela est sans compter ni l'écho immédiat qu'aurait un tel événement auprès des usagers, des médias, ni les conséquences des poursuites judiciaires. Car l'usager-citoyen accepte de moins en moins que la fatalité soit évoquée et recherche un responsable.

Naturellement, le gestionnaire, dont la négligence peut être à l'origine du sinistre, sera en premier lieu mis en cause. De ce fait, les maîtres d'ouvrages prennent à temps des mesures de sécurité radicales, souvent le démontage des structures en cause. On ne dispose donc heureusement pas de statistiques suffisantes sur les accidents qu'elles provoquent, pour pouvoir mener une analyse de risques. On estime en revanche la durée de vie réelle moyenne des structures à vingt ans environ, ce qui est probablement éloigné de l'optimum économique.

Du fait de ces préoccupations, une étude d'un service du ministère français de l'Équipement - la DDE du Rhône, gestionnaire du réseau routier de l'État dans la région de Lyon - a introduit pour des PPHM, la définition d'une méthode de maintenance fondée sur la hiérarchisation des dégradations observées et la priorisation des interventions [3].

Aujourd'hui, alors que la pérennité des ouvrages de signalisation routière verticale, les Portiques, Potences et Hauts Mâts (PPHM), est une préoccupation forte des gestionnaires, la définition d'une politique claire des Maîtres d'ouvrages, et en particulier de l'État, en matière de spécifications de construction et de gestion de ces ouvrages est impérative. L'objectif est que ces structures participent du développement durable. Les maîtres d'ouvrages publics se sont donc plus fortement impliqués au côté des fabricants dans la révision de la norme française XP P 98-550. Durant les cinq dernières années, le Sétra a joué un rôle important pour l'évolution de ces textes, et a été associé à la rédaction du guide technique des inspections détaillées, initiales et périodiques publié par le LCPC.[7] Ce guide propose les mesures à prendre, adaptées à chaque cas de dégradation de la structure.

2. EXPOSITION AUX CHOCS : LES NOTIONS DE HAUTEUR LIBRE ET DE GABARIT

La notion de "gabarit" qui figurait dans l'ancienne norme XP P 98-550 est relative à l'usager. Ce terme était employé par erreur à la place du terme de "hauteur libre" pour désigner le tirant d'air sous les panneaux de l'ouvrage de signalisation. En fait, la hauteur libre est la somme du gabarit et d'une revanche de sécurité de 500 millimètres, valeur minimale pour les routes nationales françaises. Au total, la hauteur libre usuelle conseillée dans la nouvelle norme sous les panneaux est de 5,500 mètres.

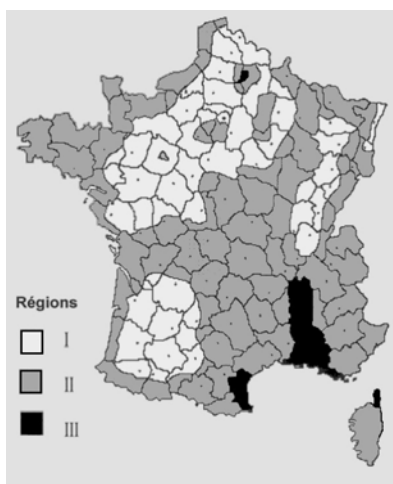
L'Eurocode 1 ajoutera bientôt une contrainte supplémentaire à la conception des structures porteuses de signalisation verticale car il prévoit des chocs réglementaires auxquels doivent résister les structures construites au-dessus de la route. Les structures porteuses non fusibles, c'est à dire les traverses, sont concernées et devraient être dimensionnées pour résister à des chocs jusqu'à une hauteur de six mètres au-dessus de la chaussée.

Cette disposition impose en pratique de placer le point bas des traverses à six mètres de hauteur au-dessus de la chaussée. Ceci conduit donc dans bien des cas à mieux centrer la traverse par rapport aux panneaux, éléments fusibles dont le point bas peut rester à 5,500 mètres de hauteur au-dessus de la chaussée. Cela empêchera donc de placer la traverse le plus bas possible par rapport au panneau, et limitera par conséquent les efforts de torsion et de distorsion de la traverse, dont tous les effets ne sont pas toujours bien pris en compte.

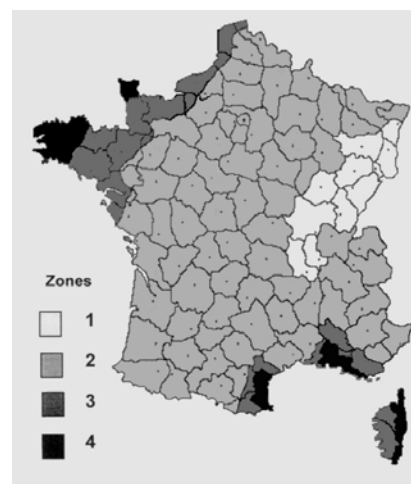
3. MODIFICATION DE LA CARTE DES VENTS

Le modificatif numéro 2 de la carte des zones de vent est paru en décembre 1999. Il est par exemple disponible auprès du CSTB (cahier 3182, livraison 405).

Ce texte comporte des cartes nationales en annexe. La carte établie pour la France tient compte de données météorologiques plus récentes, et bien plus complètes qu'en 1965.



Carte des vents de 1965



Carte des vents de 1999

La nouvelle norme révisée XP P 98-550-1 qui paraîtra prochainement s'appuiera sur la nouvelle carte. Les événements météorologiques de la fin 1999 ont du reste confirmé avec force la pertinence des modifications apportées aux cartes, qui présentent un aspect assez différent de celles qui étaient données auparavant.

4. ADOPTION D'UN COEFFICIENT DE TRAÎNÉE ADAPTÉ

L'application des Eurocodes aux structures PPHM est encore en débat. Pourtant, pour le maître d'ouvrage qui est responsable de ce choix, l'application des Eurocodes permet par rapport aux normes actuelles d'améliorer significativement la robustesse de ces structures. Ainsi, l'actuelle norme XP P 98-550 laisse le choix pour l'action du vent entre l'application des règles NV65 et l'utilisation de valeurs "forfaitaires" : le même coefficient de traînée d'un PMV rectangulaire allongé à un pour deux peut donc être pris au choix soit égal à **1,35** en application des règles NV65 ou à **1,75** avec les valeurs "forfaitaires" !

La nouvelle norme révisée XP P 98-550-1 lèvera cette ambiguïté en ne proposant que des valeurs minimales forfaitaires, c'est à dire un coefficient de traînée unique de **1,75** indépendant de la forme du panneau, et à très peu près conforme à l'Eurocode 1 [5].

5. INTRODUCTION D'UN VENT VERTICAL

Les charges verticales introduites complètent la norme XP P 98-550. Les pressions exercées par le vent dans la direction verticale représentent **30%** des pressions exercées dans la direction horizontale.

Les composantes verticale et horizontale sont concomitantes, la composante verticale tient compte des effets aérodynamiques et complète l'effet du vent décrit dans la norme XP P 98-550. Conformément à la proposition du CSTB, où des PPHM ont été étudiés en soufflerie, l'objectif est de rigidifier suffisamment dans tous les cas les structures, pour éviter de se trouver dans des domaines où les instabilités aéroélastiques sont à craindre. Le galop risquerait notamment d'apparaître sur les structures trop souples portant peu de panneaux et donc comportant un faible amortissement aérodynamique : il doit être impérativement évité.

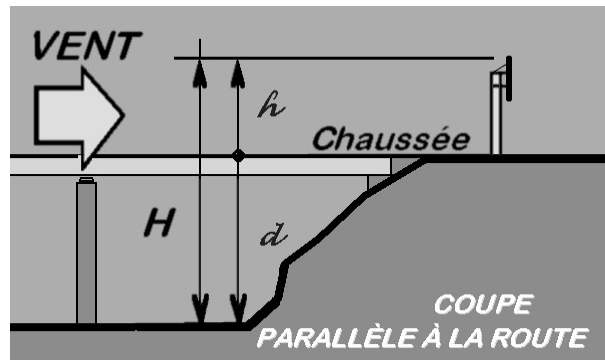
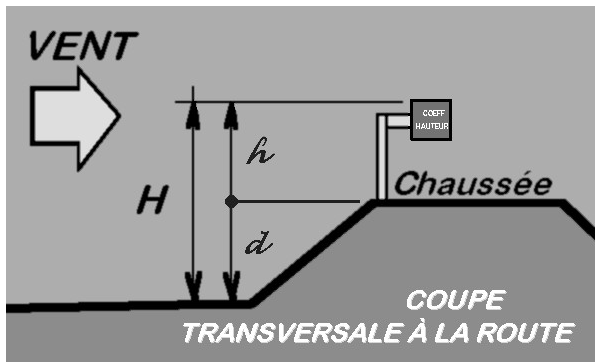
Les orientations des charges horizontales à prendre en compte sont : de face, de dos, de gauche, de droite. Les orientations des charges verticales à prendre en compte sont : de haut en bas, et de bas en haut.

L'action du vent s'exerce aussi bien sur les panneaux et leurs fixations que sur la structure porteuse. Bien entendu, les surfaces exposées au vent horizontal sont bien plus importantes que celles exposées au vent vertical.

6. RATIONALISATION DU COEFFICIENT DE HAUTEUR

Concernant le coefficient de hauteur, la lecture de l'ancienne norme XP P 98-550 pouvait prêter à confusion.

Il est donc précisé dans la nouvelle norme révisée XP P 98-550-1 que le coefficient de hauteur pris en compte par l'entrepreneur dans son offre et dans ses calculs ne dépend pas de la hauteur h au-dessus de la chaussée, mais de la hauteur totale **$H=h+d$** au-dessus de l'environnement, au sens aérodynamique, comme le précisent par exemple les figures qui suivent :



Lors de l'élaboration de son offre, l'entrepreneur est réputé avoir pris connaissance des lieux sur lesquels sont implantés les ouvrages. Dans les cas exceptionnels où la hauteur H est supérieure à 10m, les valeurs caractéristiques du vent sont multipliées par le coefficient de hauteur :

$$2,5*(H+18)/(H+60)$$

7. RÈGLES DE DIMENSIONNEMENT EN FATIGUE

Les Eurocodes apportent d'autres réponses scientifiques et des modèles de calcul adaptés. Ainsi par exemple ils prennent en compte le phénomène de fatigue des métaux, aluminium ou acier.

Les structures PPHM sont principalement sollicitées par le vent, action éminemment variable, qui sollicite sévèrement les structures en fatigue [10]. Après chaque tempête majeure, il y a des structures PPHM qui sont rendues impropres à toute utilisation. Leur démolition est alors décidée sans qu'il soit fait appel ni au constructeur pour réparer, ni à un laboratoire pour analyser la nature exacte des fissures initiales.



Tempête de janvier 1998
(Photo J. Berthelémy)



Tempêtes de décembre 1999
(Photos de DDE)

La vérification à la fatigue des structures PPHM n'est pas abordée dans la norme XP P 98-550 et ne le sera pas dans la prochaine norme révisée XP P 98-550-1. Ce sujet ne sera traité que dans une future partie 2 de cette norme. Les Eurocodes proposent cependant une démarche qui permet d'appréhender la question de la durée de vie en fatigue des structures, et de traiter cette question dans la rédaction des marchés.

Il nous a donc paru intéressant de proposer dans la publication [4] cette méthodologie pour la vérification des PPHM à la fatigue sous les effets du vent perpendiculaire au plan de la structure.

7.1 Mise en oeuvre des principes de l'Eurocode 1

(annexe B de la norme EN-1991-1-4-actions du vent de janvier 2005)

La vérification se fonde sur l'action de fatigue causée par la seule turbulence du vent horizontal. Elle suppose que la structure ne présente pas d'oscillations et que la sécurité vis-à-vis des phénomènes aéroélastiques propres à la structure est améliorée par ailleurs, notamment grâce à l'introduction d'un vent statique vertical.

L'Eurocode donne dans son annexe B le nombre de chargements à considérer pour une réponse dynamique. Ces données permettent d'établir la règle proposée ci-dessous, dont la justification est détaillée plus loin.

La fatigue due au vent est modélisée par l'action d'un « vent de fatigue », égale à une fraction de celle du vent caractéristique, qui est le vent de période de retour 50 ans, correspondant à l'habituel ELS (état limite de service).

- **Pour une durée de vie en fatigue de 25 ans, l'action du vent de fatigue sera prise égale à 22% de celle du vent caractéristique ;**
- **Pour une durée de vie en fatigue de 50 ans, l'action du vent de fatigue sera prise égale à 26% de celle du vent caractéristique.**

Le calcul consiste à vérifier que la structure résiste à 2 millions de cycles du vent de fatigue, c'est à dire que les contraintes dues au vent de fatigue sont inférieures ou égales aux catégories de détail des assemblages.

Il convient selon les principes des Eurocodes de retenir un coefficient de sécurité en fatigue γ_{MF} dépendant de l'accessibilité de l'élément justifié, de la fréquence des inspections et des conséquences d'une ruine.

Tableau 3-1 : Valeurs recommandées pour les facteurs partiels de résistance à la fatigue

| Méthode d'évaluation | Conséquence de la ruine | |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| | conséquences peu importantes | conséquences importantes |
| Tolérance de l'endommagement | 1,00 | 1,15 |
| Durée de vie sûre | 1,15 | 1,35 |

Pour les structures faisant l'objet d'une surveillance périodique, conformément aux indications données dans l'annexe C de la norme XP P 98-550, et à celles du guide LCPC pour l'Inspection des Portiques Potences et Hauts Mâts [7] il semble possible de retenir un coefficient γ_{MF} égal à **1,15**.

La pression caractéristique du vent notée Q_{kv} est définie dans la norme expérimentale XP P 98-550. Sa valeur a été revue dans la version XP P 98-550-1. Elle dépend de la zone de vent, les nouvelles zones de vent ayant déjà fait l'objet d'une publication dans le bulletin Ouvrages d'Art [9].

| Zone de vent | Vent caractéristique Pression en Pa | Vent de fatigue durée de 25 ans (P en Pa) | Vent de fatigue durée de 50 ans (P en Pa) |
|--------------|--|---|---|
| 1 | 1800 | 396 | 468 |
| 2 | 2200 | 484 | 572 |
| 3 | 2700 | 594 | 702 |
| 4 | 3200 | 704 | 832 |
| 5 | 4300 | 946 | 1118 |

7.2 Justification de la méthode proposée

On considère un assemblage dans lequel le vent caractéristique crée une contrainte de 100 MPa. On suppose que cet assemblage a une catégorie de détail de valeur X connue.

Par sommation de Miner, on peut calculer l'endommagement en fatigue à l'issue de la durée de vie désirée, en considérant l'histogramme des dépassements de niveau défini au paragraphe B3 de l'annexe B de l'EN 1991-1-4. Cet histogramme permet en effet d'établir le spectre des actions du vent. Dans ce calcul intervient la forme du diagramme de Wöhler (courbe S-N). On considère une courbe S-N à deux pentes avec troncature.

La première pente est $-1/m_1$, la deuxième est $-1/m_2$:

- $N < 5 \cdot 10^6$: la pente est $-1/m_1$
- $5 \cdot 10^6 < N < 10^8$: la pente est $-1/m_2$
- $10^8 < N$: pente nulle (troncature)

Pour tous les assemblages d'alliages d'aluminium on a comme pour l'acier $m_2 = m_1 + 2$.

Les calculs qui suivent sont faits avec cette valeur de m_2 .

Par itérations successives, on détermine la valeur de X qui conduit à un endommagement égal à 1 à l'issue de la durée de vie désirée.

Si le vent de fatigue crée dans l'assemblage une variation de contrainte égale à X, alors l'assemblage résistera exactement à 2 millions de cycles de vent de fatigue. Donc X doit être l'action du vent de fatigue sur cet assemblage. Or l'action du vent caractéristique est de 100. Donc l'action du vent de fatigue est X/100 celle du vent caractéristique.

Pour une durée de vie de 25 ans, la valeur de la catégorie de détail conduisant à un endommagement égal à 1, sous le spectre conventionnel de fatigue, lorsque le vent caractéristique donne une contrainte égale à 100, est indiquée dans le tableau ci-dessous.

| Première pente de courbe SN (m_1) | Valeur fixée pour X (catégorie de détail) |
|--|--|
| 3 | 22,6 |
| 3,5 | 22 |
| 4 | 21,6 |
| 4,5 | 21,5 |
| 5 | 21,8 |
| 6 | 22,6 |

La valeur de X varie de 21,5 à 22,6 % de la contrainte sous le vent caractéristique. Ce résultat justifie la proposition de retenir, pour une durée de vie en fatigue de 25 ans, une action du vent de fatigue égale à 22% de celle du vent caractéristique.

Pour une durée de vie de 50 ans, la valeur de la catégorie de détail conduisant à un endommagement égal à 1, sous le spectre conventionnel de fatigue, lorsque le vent caractéristique donne une contrainte égale à 100, est indiquée dans le tableau ci-dessous.

| Première pente de courbe SN (m ₁) | Valeur fixée pour X (catégorie de détail) |
|--|---|
| 3 | 26,7 |
| 3,5 | 25,5 |
| 4 | 24,9 |
| 4,5 | 24,6 |
| 5 | 24,6 |
| 6 | 25,2 |

Ce résultat justifie la proposition de retenir, pour une durée de vie en fatigue de 50 ans, une action du vent de fatigue égale à 26% de celle du vent caractéristique.

7.3 Exemple d'application à des tiges d'ancrage

Une justification vis-à-vis de la fatigue peut être produite pour :

- les tiges d'ancrage et les assemblages boulonnés,
- les assemblages soudés, en distinguant soudures à pleine pénétration et cordons de soudure, et en se référant à l'Eurocode 3 pour l'acier et à l'Eurocode 9 pour l'aluminium.
- Les systèmes d'attache des panneaux.

Le niveau des charges de fatigue est lié à la durée de vie attendue par le client. Nous proposons pour simplifier deux classes : durée de vie de vingt cinq ans pour des **ouvrages ordinaires**, et de cinquante ans pour des **ouvrages robustes**.

Mais un marché pourrait facilement demander en fonction des besoins un nombre d'années de service T intermédiaire entre 25 et 50, ou supérieur à 50 selon la pérennité souhaitée, et préciser le vent de fatigue. Par simplification, on peut estimer en terme de contraintes l'effet du vent de fatigue pour une durée de vie de T années à :

$$\Delta\sigma_{Tans} = (T/50)^{1/4,14} * 0,26 * \sigma_{\text{Vent caractéristique}}$$

On vérifie simplement

$$\Delta\sigma_{Tans} * \gamma_{MF} < \Delta\sigma_{\text{Classe à } 2M_{\text{cycles}}}$$

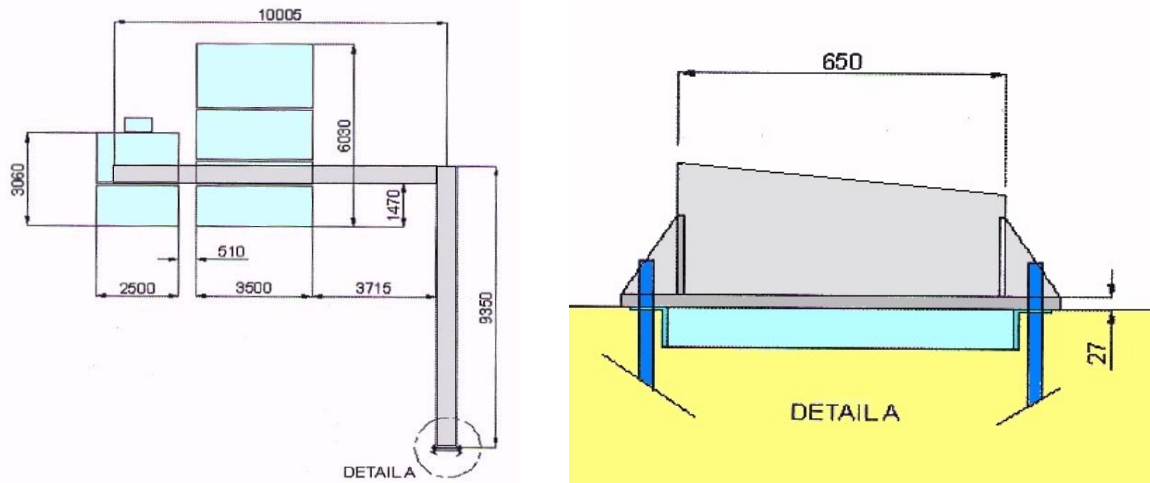
Prenons à titre d'exemple des tiges d'ancrages en acier roulé, de limite élastique de 355 MPa. Dans ce cas, la classe de fatigue est :

$$\Delta\sigma_{\text{Classe à } 2M_{\text{cycles}}} = 50 \text{ MPa}$$

dans les conditions de l'Eurocode 3 (pr EN) ou de la norme XP 22-311. Notons que le projet d'EN prévoit un effet de dimension pour les diamètres supérieurs à 30 mm :

$$\Delta\sigma_{\text{Classe à } 2M_{\text{cycles}}} = (30 / \Phi)^{0,25} * 50 \text{ MPa}$$

Pour la simplicité de l'exemple, on va choisir un assemblage en pied renforcé par un cadre de cornières, mais un raisonnement analogue peut être mené sur d'autres détails.



De cette façon, le dimensionnement des tiges d'ancrage dans le béton est actuellement mené à l'ELU (état limite ultime) de résistance en s'assurant qu'on reste dans le domaine élastique pour toutes les tiges.

Chaque calcul étant un calcul élastique, on passe en fait linéairement du calcul ELU de résistance au calcul de fatigue. Il n'y a pas de moment fléchissant parasite dans les tiges puisque l'effort tranchant et la torsion sont repris par le cadre de cornières.

Dans ce cas précis de tiges d'ancrages en acier non soumises à des flexion parasites, la comparaison est immédiate et la durée de vie de fatigue D_{vie} caractéristique (calculée avec un coefficient de sécurité γ_{MF} de **1,00**) peut être déterminée facilement pour des tiges de 355 MPa de limite élastique et classées à 50 MPa en fatigue : elle est de **22 ans**.

$$D_{vie} = 50 * ((50 * 1,50) / (1,00 * 355 * 0.26)) ** 4,14 = \mathbf{22 \text{ ans}}$$

Ce résultat confirme que les structures actuelles, dimensionnées selon la norme XP P 98-550, doivent faire l'objet d'une surveillance, comme l'annexe C informative invite les maîtres d'ouvrages à le faire.

Les structures plus âgées sont susceptibles de présenter des amorces de fissuration en fond de filet pour les tiges les plus sollicitées, généralement placées dans les angles.

Les structures qui auraient été dimensionnées en résistance avec des tiges de plus haute limite élastique ont une durée de vie encore plus réduite. Les tiges de plus de 355 MPa de limite élastique sont à éviter, car leur classement en fatigue reste le même.

En revanche des tiges d'ancrages des années 60 encore en acier E24 de 235 MPa de limite élastique auront sans doute une durée de vie plus longue, sous réserve que la corrosion n'affaiblisse pas les tiges d'ancrage :

$$D_{vie} = 50 * ((50 * 1,50) / (1,00 * 235 * 0.26)) ** 4,14 = \mathbf{52 \text{ ans}}$$

Une méthode de détection des fissures dans les tiges d'ancrage, fondées sur le principe des US (réflexion des ultra-sons), a été mise au point en laboratoire [6]. Il est désormais possible de l'appliquer in situ car elle donne des résultats fiables, à condition de prendre en compte ses limites tant opératoires que physiques notamment vis-à-vis du diamètre minimal des tiges, en deçà duquel on observe une incertitude. En cas de doute, le démontage des boulons, voire même de toute la structure, reste nécessaire pour permettre une investigation approfondie des tiges d'ancrages, qui peuvent alors être testées mécaniquement une par une. Pour des candélabres, des essais mécaniques peuvent en revanche se pratiquer le plus souvent sans démontage [8].

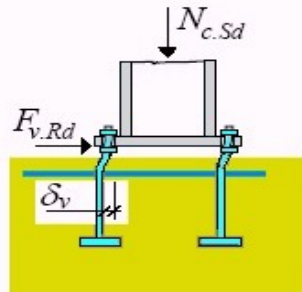
7.4 Cas particulier du montage aérien

Le montage aérien est la solution aujourd'hui la plus courante, en raison de sa facilité de mise en œuvre. Néanmoins, il suppose que des dispositions particulières soient prises :

- la protection contre la corrosion des tiges d'ancrage doit avoir une durée de vie compatible avec la durée de vie attendue de la structure. En l'absence de surépaisseur sacrificielle, cette disposition limite son emploi à des ambiances chimiquement peu agressives, si l'on attend une durée de vie attendue de la structure supérieure à 15 ans;
- le massif de fondation doit être légèrement surélevé et conçu pour éviter toute stagnation d'eau dans l'espace entre la platine et le béton;
- les tiges d'ancrage doivent être correctement ventilées et protégées des projections d'eau provenant de la chaussée.

Les protections définies ci-dessus sont nécessaires, car les abords de la route constituent souvent un milieu chimiquement très agressif, comme l'ont établi les mesures rapportées dans [12] : une expérimentation grandeur nature dans un TPC de l'autoroute A1 a mis en évidence une vitesse de consommation du zinc sacrificiel de $2,5 \mu\text{m}/\text{an}$ à $4,4 \mu\text{m}/\text{an}$. Pour une épaisseur de zinc déposée par galvanisation de $80 \mu\text{m}$, il en résulte une durée de vie de l'ordre de 15 ans sur autoroute fortement salée, alors que l'on peut espérer 50 ans en rase campagne.

Lorsque le montage est aérien, le calcul en fatigue doit tenir compte de la flexion locale des tiges sous un effort horizontal, en considérant les tiges comme encastées au niveau des aciers de béton armé dans le massif de fondation d'une part, et sous la platine d'embase de l'ouvrage au niveau inférieur de l'écrou, s'il est bien serré, d'autre part.



Montage en aérien : Effet local dans les tiges.

Une alternative possible au montage aérien est le recours à un montage avec un produit de calage normalisé coulé sous l'embase. Ces travaux demandent alors un soin très particulier, sinon la corrosion des tiges d'ancrage peut se développer et rester dissimulée par le mortier de calage. Ce type de montage doit donc être réservé aux cas des expositions fortement agressives (brouillard salin, projections de sels de déverglaçage). Avec un remplissage de produit de calage, effectué dans les règles de l'art, contrôlé, et maintenu durant la vie de l'ouvrage, il est acceptable de ne pas cumuler en fatigue l'effet de la flexion locale des tiges avec les autres effets.

8. MISE EN ŒUVRE DES SPÉCIFICATIONS DU PRÉSENT ARTICLE

Les structures PPHM doivent en France être calculées au cas par cas. Selon leur implantation, elles sont soumises à des charges différentes de vent. Mais dans le passé, les cahiers des charges des structures porteuses de signalisation verticale étaient souvent

incomplets, ce qui pouvait revenir par exemple à demander à l'entreprise de faire à la place du Maître d'ouvrage le choix des coefficients de site et de traînée.

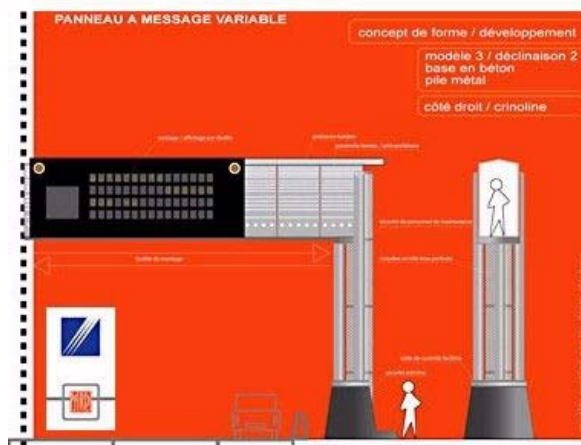
En revanche, des recommandations lors des marchés de travaux neufs, afin d'obtenir la qualité requise pour des ouvrages pérennes sont aujourd'hui disponibles : depuis 2003, le Sétra a rassemblé dans un cahier des charges expérimental une aide à la commande, c'est à dire au choix des spécifications et les clauses qui permettent d'améliorer la robustesse des produits commandés. Ces documents peuvent déjà être utilisés en attendant la publication par l'AFNOR de la norme XP P 98-550-1.

Le cahier des charges expérimental tient compte des cahiers des clauses techniques générales (CCTG) des marchés de l'État concernant des ouvrages de génie civil, sans pour autant remettre en cause l'exigence d'une certification de l'Association pour la qualification des équipements de la route (ASQUER) rendue obligatoire en France par un **arrêté**.

Le document définit également le processus d'élaboration d'un PPHM, depuis la période de préparation jusqu'à la réception de l'ouvrage. Ainsi, à chaque étape, correspondent des points d'arrêt. Les contrôles sont alors des passages obligés, et le risque d'apparition de défauts, tels que nous les connaissons parfois à présent, s'en trouve très réduit.

8.1 Application à des structures porteuses de signalisation verticale

L'étude de structures porteuses de PMV architecturales conçues pour la région de Saint-Étienne à l'initiative de la DDE de la Loire constitue une des premières applications des concepts précédents. Le Maître d'ouvrage est l'État, et la conception est assurée par le Sétra, associé au bureau "Pardi-Design" en charge de l'esthétique du projet.



On note que les massifs de béton s'élèvent jusqu'à hauteur des yeux, pour mettre l'interface et ses tiges d'ancrage à l'abri des projections. L'interface est aussi à hauteur des yeux de l'inspecteur qui vérifie l'intégrité de la structure. Les montants verticaux sont constitués de trois tubes redondants.

8.2 Application aux candélabres

La question de la fatigue se pose pour les hauts mâts d'éclairage comme pour les ouvrages de signalisation. Cette question est traitée par exemple dans [2].

La norme EN40 laisse les États européens libres de réglementer les fûts de candélabre vis-à-vis de la fatigue due au vent et ne fait aucune recommandation. Un fût métallique de candélabre marqué CE, est seulement strictement conforme à l'EN40 : c'est une certaine garantie de qualité, mais le fût marqué CE ne présente vis-à-vis de la fatigue, à l'égard des effets dynamiques du vent, aucune qualité particulière de durabilité.

Les outils qui ont été décrits plus haut pour traiter dans les spécifications des marchés la fatigue causée par le vent, peuvent être utilisés pour les candélabres d'éclairage public et compléter ainsi l'EN40 sur ce point quand c'est nécessaire, quelle que soit la hauteur du fût. On pourra se reporter pour plus de détails à [1].

9. CONCLUSION

Les tempêtes de 1998 et 1999, qu'elles participent ou non d'un changement climatique, ont été utiles en éliminant sans faire heureusement de victimes les structures porteuses de signalisation qui comportaient déjà des points faibles, comme des fissures de fatigue.

Avec la publication des Eurocodes, il est maintenant possible pour les gestionnaires de routes qui le souhaitent, de tenir compte du risque de fissuration des pièces métalliques suite à des sollicitations de fatigue causées par le vent, à l'occasion du dimensionnement des structures neuves.

La méthode simple qui a été présentée peut être immédiatement appliquée aux structures porteuses de signalisation et ouvrages d'art ainsi qu'à d'autres structures et équipements du domaine routier comme les dispositifs anti-bruit, les candélabres, les corniches des ponts, tous concernés par l'effet de la fatigue causée par le vent. Dans tous les cas, il appartient au maître d'ouvrage de définir la durée de service à prendre en compte.

RÉFÉRENCES

1. BERTHELLEMY, J.; "Éclairage public. Quelques éclaircissements pour les maîtres d'ouvrages." Bulletin OUVRAGES D'ART du Sétra n°55, à paraître
2. State of IOWA; "Field instrumentation, testing and long term monitoring of high mast lighting towers in the State of Iowa" Final report, Novembre 2006.
3. PAILLOUX, M.; BERTHELLEMY, J.; CROZET, C.; et al.; "Les portiques, potences et hauts mâts : Pathologie et enjeux." Revue générale des routes RGRA N°846 février 2006.
4. KRETZ, T.; BERTHELLEMY, J.; " Propositions pour la vérification à la fatigue des Portiques, Potences, et Hauts Mâts." Bulletin ouvrages d'art du Sétra numéro 49, juillet 2005.
5. Eurocode 1; vent, annexe B : Comité Européen de Normalisation EN 1991-1-4 "Actions du vent sur les structures" - Référence CEN/TC 250/ Annexe B, texte adopté et publié en français en janvier 2005.
6. BARBIER, V.; GOURY, Ph.; "Mise au point d'une méthode de détection des défauts par ultrasons dans les tiges d'ancrage." Bulletin ouvrages d'art du Sétra n°50, novembre 2005.
7. Guide technique : "Maintenance et surveillance des Portiques - Potences - Hauts-Mâts" (P.P.H.M.)- "Inspections détaillées, initiales et périodiques" 2005 - LCPC
8. BERTHELLEMY, J.; "Éclairage du réseau des routes nationales : Recommandations pour le contrôle de la stabilité des supports par un essai de chargement statique.", Sétra, note d'information n°125, octobre 2003.
9. BERTHELLEMY, J.; "RÈGLES NV65 Modification de la carte des zones". Bulletin Ouvrages d'Art n°36, décembre 2000
10. JOHNS, K.W.; DEXTER, R.J.; "The development of fatigue design load ranges for cantilevered sign and signal support structures." Journal of wind engineering, Elsevier, 1998.

11. XP P 98-550 "Signalisation routière verticale : Portiques, potences et hauts mâts; Spécifications de calcul, mise en oeuvre, contrôle" "Vertical road traffic signs - Gantries, cantilevers and high masts - Calculation specifications, installation and control" Norme expérimentale, AFNOR, Août 1996
12. PIESEN, Ph. (Association Galvazinc) et FRAGNET, M. (Sétra) : "L'environnement routier et autoroutier et son effet sur la durée de vie d'une galvanisation" - Bulletin Ouvrages d'Art n°10 juillet 1991.