

# Vérification en fatigue

## L'Europe reprend la procédure simplifiée suisse

Alain Nussbaumer, Lausanne

### 1 INTRODUCTION

La norme SIA 161 (1990) contenait des innovations dans plusieurs domaines, en particulier celui de la vérification vis-à-vis de la fatigue. Le concept du facteur de correction  $\alpha$ , qui permet de s'affranchir dans la vérification de la prise en compte d'un chargement réel d'amplitude variable, était révolutionnaire. Cette idée a fait son chemin et aujourd'hui, les Eurocodes ont adopté ce concept dans la vérification en fatigue, rejoignant ainsi notre norme. La nouvelle version du chapitre fatigue de la SIA 263 comporte néanmoins quelques adaptations par rapport à la SIA 161. Celles-ci proviennent d'une part des modèles de charge adoptés dans la SIA 261 et d'autre part de l'Eurocode 3, qui inclut des connaissances récentes dans le domaine. Ce document présente les principes de la vérification ainsi que les adaptations faites par rapport à la précédente norme.

### 2 CONCEPT DU FACTEUR DE CORRECTION

Il faut plusieurs étapes de calcul et de nombreuses informations pour pouvoir effectuer une vérification de la sécurité à la fatigue avec le cumul de dommage, voir également figure 6.1, soit :

1. Modéliser les charges d'exploitation et les faire circuler sur l'ouvrage,
2. Déduire l'historique des contraintes correspondant,
3. Calculer l'histogramme des différences de contrainte  $\Delta\sigma_i$  qui en résulte,
4. Calculer le cumul des dommages,

5. En déduire la différence de contrainte équivalente  $\Delta\sigma_e$  qui en résulte.

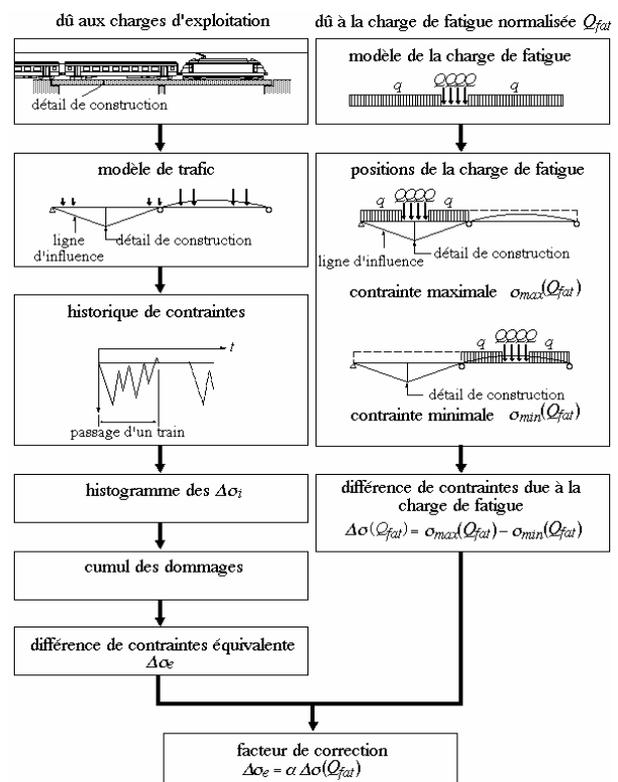


Figure 6.1 schéma expliquant le concept du facteur de correction

Cette démarche est relativement compliquée, notamment en comparaison avec le calcul statique habituel qui s'effectue avec des modèles de charge simples.

Il est toutefois possible de simplifier ce calcul, en utilisant un modèle de charge propre à la fatigue, pour obtenir une contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  et minimale  $\sigma_{\min}$ , en plaçant ce modèle à chaque fois dans la position la plus défavorable selon la ligne d'influence du système statique de l'ouvrage. Toutefois, la différence de contrainte  $\Delta\sigma(Q_{fat})$ , due à ce modèle de charge,

ainsi obtenue ne représente en rien l'effet de fatigue dû aux charges d'exploitation, mais elle a le mérite de se calculer facilement. Pour obtenir la même valeur que la différence de contrainte équivalente  $\Delta\sigma_e$ , il faut corriger la valeur de  $\Delta\sigma(Q_{fat})$  avec un facteur de correction, appelé dorénavant  $\lambda$ , qui vaut :

$$\lambda = \frac{\Delta\sigma_e}{\Delta\sigma(Q_{fat})}$$

De plus amples informations sur le facteur de correction sont données au paragraphe 6.

### 3 PRINCIPE DE VERIFICATION

Par rapport à la précédente norme, le principe de vérification n'a pas changé mais s'exprime un peu différemment:

$$\Delta\sigma_{E2} \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf} \quad (263.27)$$

avec  $\Delta\sigma_{E2} = \lambda \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$

Et dans les zones des joints de dilatation des ponts-routes:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \cdot \phi \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$$

Où

- $\lambda$  facteur global de correction
- $\gamma_{Mf}$  facteur de résistance à la fatigue
- $\phi$  coefficient dynamique pour les joints de dilatation
- $\Delta\sigma_{E2}$  différence de contrainte équivalente à 2 millions de cycles
- $\Delta\sigma_C$  résistance à la fatigue de la catégorie de détail à 2 millions de cycles
- $Q_{fat}$  charge caractéristique pour la vérification en fatigue selon la norme SIA 261. Cette charge inclut le coefficient dynamique, où nécessaire (ponts-rails, ponts-roulants).
- $\gamma_{Ff}$  facteur de charge pour la fatigue, qui vaut 1,0 (SIA 261).

Dans le cas de contraintes de cisaillement, la vérification est analogue, chiffre 4.7.4.8.

Le facteur de correction, dénommé "global", est une combinaison de plusieurs facteurs de

correction qui permettent de tenir compte du trafic, du système statique, ainsi que d'une durée d'exploitation différente de la valeur fixée habituellement ou de l'effet de plusieurs charges de fatigue sur la structure porteuse (plusieurs voies de circulation avec trafic lourd, plusieurs ponts roulants se partageant la même voie de roulement, etc.). Ceci est expliqué plus en détail au paragraphe 6. Cette vérification est une procédure simplifiée; il est toujours possible d'effectuer une vérification à l'aide d'un cumul de dommage en utilisant le chiffre 4.7.4.4 (formule 263.29) lorsque l'on connaît le chargement réel sur la structure.

En ce qui concerne le facteur de résistance, un changement de philosophie a été introduit. En effet, ce facteur n'a plus une valeur unique, mais dépend de l'influence bénéfique de paramètres tels que la redondance et l'inspection régulière des ouvrages sur la fiabilité, ainsi que des conséquences d'une rupture, voir tableau 6.1. En effet, le modèle de charge et celui d'endommagement comportent des simplifications, les fissures de fatigue pouvant se développer à des endroits non vérifiés car, par exemple, théoriquement peu sollicités.

Conséquences de la rupture		
	Dommages peu importants	Dommages importants
<i>Possibilité de constater et de réparer les dommages à temps</i>	1,00	1,15
<i>Impossibilité de constater et/ou de réparer les dommages à temps</i>	1,15	1,35

Tableau 6.1 facteur de résistance à la fatigue  $\gamma_{Mf}$  (tableau 10 de la SIA 263)

La possibilité de constater les dommages lors d'inspections et de pouvoir les réparer à temps –en particulier si il y a redondance de la structure– permet de diminuer la valeur de  $\gamma_{Mf}$ , car les incertitudes sur la fiabilité de la structure sont moindres. Les conséquences de la rupture

sont fonction de multiples paramètres tels que: rupture partielle ou totale, importance de l'ouvrage dans le réseau, possibilités de mort d'hommes passant sur ou sous l'ouvrage, etc.

## 4 CHARGES ET DUREES DE VIE

### 4.1 Charges

Pour les vérifications en fatigue, seul le modèle de charge pour les ponts routiers a changé. Le modèle 1 de la SIA 261 introduit la notion de voies de circulation fictives, dont le nombre et la largeur dépendent de la largeur de la chaussée. Sur chacune de ces voies, on dispose un groupe d'essieux à deux axes chacun, ceci symétriquement par rapport à l'axe de la voie, voir la figure 6.2. Les distances ont légèrement changé mais le groupe d'essieux reste identique à celui de la SIA 160. La charge est transmise à l'ouvrage par des roues à surfaces d'application carrées de 0,4 m de côté. Dans le cas de la vérification en fatigue, **seul le groupe d'essieux  $Q_{kl}$  de 300 kN sur la voie la plus à droite est à prendre en compte**. C'est avec cette charge que les valeurs du facteur de correction  $\lambda$  ont été déterminées. Cette charge doit être multipliée par un facteur de calibration  $\alpha_{Q1}$ , qui sera pris égal à 0,9 pour la fatigue (ch. 10.3.2 de la SIA 261).

Pour les ponts-routes, le coefficient dynamique (anciennement  $\phi = 1,8$ ) n'est plus défini de la même manière. Il n'est à prendre en compte que dans les zones des joints de dilatation de la chaussée, jusqu'à une distance de 3 m du joint, et ne vaut plus que  $\phi = 1,3$  (ch. 10.3.4 de la SIA 261). Pour les ponts-rails, il est resté identique à la SIA 160. Pour de plus amples informations quant aux charges, se référer à la documentation d'introduction à la SIA 261 [6.2].

Les charges pour les ponts ponts-rails (voies normales et étroites) sont identiques à celles de la SIA 160, bien que cela ne reflète pas toujours les charges des normes européennes. De même pour les ponts roulants, les charges étant

qu'il appartient au maître de l'ouvrage d'évaluer.

identiques à celles de la SIA 160, et données dans la norme 261/1 (à paraître) [6.3].

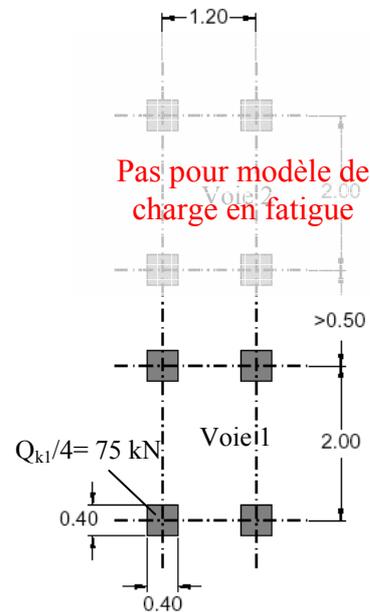


Figure 6.2 groupe d'essieux pour la charge caractéristique d'un pont-route selon la SIA 261

### 4.2 Différence de contrainte de dimensionnement

Comme dans la SIA 161, le modèle de charge pour la fatigue doit être placé dans les deux positions les plus défavorables de manière à obtenir la contrainte maximale,  $\sigma_{\max}$ , respectivement minimale,  $\sigma_{\min}$ . La différence de contrainte vaut alors :

$$\Delta\sigma(Q_{fat}) = \left| \sigma_{\max}(Q_{fat}) - \sigma_{\min}(Q_{fat}) \right| \quad (263.30)$$

Cependant, alors que dans la SIA 161 l'effet de contraintes de compression était pris en compte en utilisant  $\gamma_{fat} = 1,0$ , dans la SIA 263 c'est la détermination de la différence de contrainte  $\Delta\sigma(Q_{fat})$  qui est modifiée. Lorsque  $\sigma_{\min} < 0$ , alors selon le chiffre 4.7.4.6:

$$\Delta\sigma(Q_{fat}) = \left| \sigma_{\max}(Q_{fat}) \right| + \left| 0,6 \cdot \sigma_{\min}(Q_{fat}) \right| \quad (263.31)$$

La différence de contrainte de calcul peut donc être réduite de 40% au maximum.

Dans le cas de contraintes de cisaillement, cette réduction n'existe pas et la différence de contrainte  $\Delta\tau$  ( $Q_{fat}$ ) se calcule de manière analogue à (263.30).

### 4.3 Durées de vie

Les durées d'exploitation n'ont pas changé, soit 70 ans pour les ponts-routes et 100 ans pour les ponts-rails. Il est cependant possible de tenir compte d'une durée de vie différente par l'intermédiaire du facteur de correction  $\lambda_3$ , voir paragraphe 6.

## 5 RESISTANCE

Comme dans la norme SIA 161, la résistance à la fatigue est décrite au moyen de tableaux qui contiennent des catégories de détails. Ceci fait l'objet de l'annexe E dans la SIA 263. Le nombre de détails répertoriés a augmenté, mais les deux changements majeurs concernent :

- la forme de la courbe de résistance à la fatigue,
- la colonne conditions particulières.

Ils sont décrits ci-après.

### 5.1 Courbes de résistance

Les courbes de résistance correspondent à celles de l'Eurocode 3 [6.1] et de la recommandation CECM [6.4]. Comme montré à la figure 6.3, elles se caractérisent par leur changement de pente à 5 millions de cycles. En deçà de cette valeur, une pente  $m = 3$  est utilisée. Au-delà, la pente vaut  $m = 5$ , ceci jusqu'à 100 millions de cycles. Cette dernière valeur correspond à la limite de troncature, qui permet de négliger les cycles de différences de contrainte inférieures à cette valeur dans le cumul de dommage car ils ne contribuent que de manière marginale au dommage total. Cette courbe à double pente représente mieux l'endommagement dû aux cycles qui se situent sous la limite de fatigue que la courbe à pente

unique utilisée précédemment. Toutefois, elle rend le calcul du cumul de dommage à l'aide du chiffre 4.7.4.4 un peu plus délicat, car il faut faire attention à utiliser la bonne valeur de la pente  $m$  selon le niveau de la différence de contrainte  $\Delta\sigma_i$ .

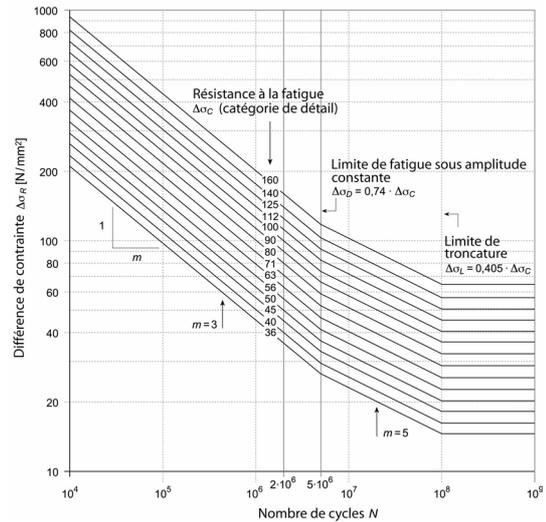


Figure 6.3 courbes de résistance à la fatigue (figure 50 de la SIA 263)

Pour une estimation rapide, le calcul avec une pente unique  $m = 3$  est possible, bien que très conservateur. La valeur de la limite de fatigue sous amplitude constante reste fixée à 5 millions de cycles. Si aucun cycle de contrainte ne dépasse cette valeur, alors la durée de vie du détail est infinie. C'est cette condition qui est exprimée au chiffre 4.7.1.3, et également au chiffre 4.7.4.7 comme vérification de l'état limite fatigue.

### 5.2 Conditions particulières

Dans les tableaux décrivant les détails, tableaux 21 à 25, on retrouve les mêmes informations que dans l'ancienne norme. Toutefois, l'utilisation d'une colonne dénommée conditions particulières est plus systématique. Elle permet de résumer l'influence de certaines dimensions du détail sur la résistance à la fatigue. Comme dans la SIA 161, l'influence de la longueur d'un gousset longitudinal est donnée dans cette colonne. La nouveauté concerne la réduction de la résistance à la fatigue en fonc-

tion de l'épaisseur pour plusieurs détails, tels que les boulons en traction et les joints transversaux en bout. Pour d'autres détails, la résistance devient fonction de plusieurs paramètres géométriques, par exemple les assemblages cruciformes d'éléments porteurs.

Ces changements reflètent les résultats récents de la recherche et des essais réalisés à travers le monde. Bien que des variations dans les pratiques de soudage entre les pays soient possibles, il a été admis que les valeurs données correspondaient aux exigences de qualité de la classe C selon SN EN 25 817 [6.5]. Les autres exigences de qualité de préparation et de soudage figurent dans les colonnes dénommées description et exigences des tableaux 21 à 25.

## 6 FACTEUR DE CORRECTION SELON SIA 263

Afin de permettre à l'ingénieur une vérification en fatigue simple et rapide, le concept de facteur de correction a été repris. Toutefois, il a été étoffé pour permettre de tenir compte de certains paramètres supplémentaires. Le facteur de correction dit global se décompose comme suit (chiffre F.1.1):

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \quad \text{avec } \lambda \leq \lambda_{\max} \quad (263.95)$$

Où

- $\lambda$  facteur global de correction des charges permettant l'équivalence du dommage associé au modèle de charge de trafic et le dommage dû aux charges réelles de fatigue. Il dépend de : la composition du trafic, son volume, la durée d'exploitation, la valeur des charges de fatigue et le système statique.
- $\lambda_1$  facteur partiel de correction, dépendant de la longueur d'influence  $L_\Phi$  et du volume de trafic.
- $\lambda_2$  non utilisé dans la SIA 263. Dans l'Eurocode 3 [6.1], c'est le facteur partiel de correction pour tenir compte d'un volume de trafic différent de celui donné dans la norme.
- $\lambda_3$  facteur partiel de correction, dépendant de la durée d'exploitation. Pour les du-

rées d'exploitation fixées selon la SIA 261, il vaut  $\lambda_3 = 1,0$ . Pour d'autres cas, voir l'Eurocode 3 [6.1].

- $\lambda_4$  facteur partiel de correction pour la prise en considération de plusieurs charges de fatigue sur la structure porteuse.
- $\lambda_{\max}$  limite supérieure du facteur de correction global afin de considérer la limite de fatigue.

Par rapport à l'ancienne norme, qui incluait la limite de fatigue directement dans les valeurs du facteur de correction, ce cas doit être traité séparément dans la nouvelle norme à l'aide de  $\lambda_{\max}$  à cause de la décomposition en facteurs partiels de correction (voir par exemple le chiffre F2.2 pour les ponts-routes).

Les valeurs du facteur de correction ont dû être recalculées pour tenir compte des changements dans le trafic des poids lourds, dans le modèle de charge, mais pas de la courbe de résistance. En effet, dans la SIA 161, les valeurs du coefficient appelé  $\alpha$  avaient déjà été calculées avec une courbe à double pente. Par conséquent, seules les figures pour les ponts-routes ont changé. Les nouvelles courbes pour  $\lambda_1$  sont données dans la figure 6.4.

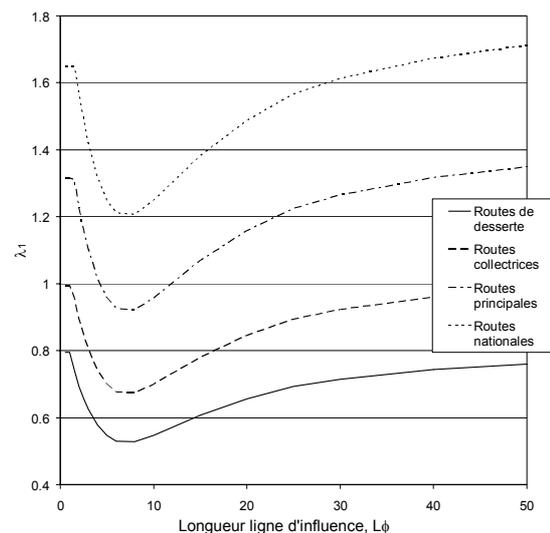


Figure 6.4 facteur de correction  $\lambda_1$  pour les ponts-routes (figure 51 de la SIA 263)

Dans le cas où il y a plusieurs voies de trafic avec un trafic lourd, ou plusieurs ponts-roulants utilisant la même voie, il faut calculer la différence de contrainte due au modèle de charge placé sur chaque voie, puis calculer la valeur du facteur partiel  $\lambda_4$  à l'aide de la formule suivante (chiffre F.6.1) :

$$\lambda_4 = \left[ \sum_{j=1}^n \left( \frac{\lambda_{1,j} \Delta\sigma_j}{\lambda_{1,1} \Delta\sigma_1} \right)^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (263.96)$$

avec:

$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_j$  différence de contrainte près du détail provoquée par le modèle de charge de fatigue placé sur la voie 1, respectivement j.

$\lambda_{1,1}, \lambda_{1,j}$  facteur partiel de correction  $\lambda_1$ , correspondant aux conditions (volume de trafic) sur la voie 1, respectivement j.

n nombre total de voies ou de ponts roulants.

m valeur de la pente de la courbe de résistance.

Cette formule est également valable pour estimer l'influence du trafic bidirectionnel (avec dans chaque sens le volume de trafic selon la SIA 261), sans croisements, sur un pont lorsque le même élément porteur supporte les deux voies. Le tableau 26 donne les valeurs pour le cas type d'un pont à deux voies avec trafic bidirectionnel deux voies.

## 7 REMARQUES FINALES

Effectuer des vérifications en fatigue ne suffit pas car il est possible de réduire nettement la sensibilité d'une structure à la fatigue en adoptant une bonne conception [6.6, 6.7]. Ceci implique un choix judicieux de la configuration globale de la structure ainsi qu'une sélection soignée de détails constructifs résistant à la fatigue. La clef de la conception vis à vis de la fatigue est une prise en compte rationnelle de la fatigue dès le début du processus de conception. Une évaluation de la fatigue réalisée seulement après la satisfaction d'autres critères de

calcul peut conduire à une structure mal adaptée ou coûteuse. Il est également important de prendre en compte les besoins du fabricant et du monteur. Il est donc recommandé de les consulter le plus tôt possible afin de repérer les zones de la structure qui sont les plus sensibles aux fissurations de fatigue, de discuter des précautions particulières et de prendre conscience des problèmes de fabrication et de montage. En particulier, il convient d'étudier pendant l'évaluation de la fatigue l'utilisation d'ouvertures ou d'accessoires de levage destinés à faciliter la fabrication ou le montage.

## 8 REFERENCES

- [6.1] prEN1993-1-9 (2002). *Eurocode 3: calcul des structures en acier - Partie 1.9: Fatigue*; Comité Européen de Normalisation (CEN); Bruxelles; 29 pp.
- [6.2] D 0181 (2003). *Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Einwirkungen auf Tragwerke. Einführung in die Normen SIA 260 und 261*; Société Suisse des ingénieurs et architectes (SIA) ; Zurich ; 109 pp.
- [6.3] SIA 261/1 (à paraître). *Actions sur les structures porteuses – spécifications complémentaires*; Société Suisse des ingénieurs et architectes (SIA); Zurich.
- [6.4] CECM n° 43 (1987). *Recommandations pour la vérification à la fatigue des structures en acier*; Comité technique 6; Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM); Bruxelles; 32 pp.
- [6.5] ISO 5817 (1992). *Assemblages en acier soudés à l'arc – recommandation concernant les niveaux de qualité et les défauts*; Organisation internationale de normalisation (ISO); Genève; 9 pp.
- [6.6] CECM n° 105 (2001). *Good design practice: a guide to fatigue design*; Comité technique 6; Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM); Bruxelles; 53 pp.
- [6.7] Euro-inox (2002). *Structures en acier inoxydables – guide de conception*; The European Stainless Steel Development Assoc, Série Bâtiment, vol. 3; Bruxelles; 110 pp.