

L'évaluation des structures existantes

Autor(en): **Kunz, Peter / Bez, Rolf / Hirt, Manfred A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **120 (1994)**

Heft 5

PDF erstellt am: **18.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78305>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

L'évaluation des structures existantes

Un nouveau défi pour l'ingénieur civil

Les auteurs de cet article souhaitent dédier ces quelques réflexions concernant l'évaluation des structures existantes au professeur Jörg Schneider, à l'occasion de son 60^e anniversaire. Le professeur Schneider a toujours été actif dans le domaine de la sécurité des structures. Il a notamment été, à la fin des années 70, le père spirituel de la directive SIA 260 destinée à coordonner les normes SIA relatives à la sécurité et l'aptitude au service des structures. Ce document a par la suite servi de base à la nouvelle génération de normes suisses sur les structures (SIA 160, SIA 161 et SIA 162). Il est également président du Joint Committee on Structural Safety (JCSS), qui est une organisation faîtière de plusieurs organismes internationaux (CEB, CIB, CECM, FIP, AIPC entre autres) destinée à harmoniser certaines questions touchant à la sécurité des structures en général. Le professeur Schneider donne à l'EPFZ un cours sur la sécurité et la fiabilité des structures, dont le contenu paraîtra prochainement sous forme de livre. Nous mentionnerons encore, pour terminer cet hommage, qu'il a été à plusieurs reprises corapporteur de travaux de thèse défendus à l'ICOM, et qu'il a toujours été disponible et intéressé à partager ses connaissances, en stimulant ainsi la réflexion et la formation d'ingénieurs de tous âges.

1. Introduction

Le nombre croissant d'exigences très diverses dans le domaine de la construction rend la conception de nouvelles structures de plus en plus complexe. La nouvelle génération de normes suisses relatives aux structures publiées ces cinq dernières années par la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) [1], [2], [3]¹ représente toutefois pour l'ingénieur civil une aide concrète, qui lui fournit une base cohérente et moderne pour le dimensionnement. Par ailleurs, il faut relever le fait que le nombre et l'âge des structures existantes augmente continuellement, ce qui fait que les ingénieurs et les architectes sont toujours davantage confrontés à des questions touchant à l'évaluation et à la maintenance de structures existantes [4] [5] [6]. Cet article a pour but de présenter quelques réflexions fondamentales pour l'évaluation des structures existantes. Quelques questions relatives à la démarche générale d'évaluation, qui dépend essentiellement du

type d'utilisation encore prévue, sont d'abord abordées. Les principes de base concernant les vérifications de la sécurité structurale, de l'aptitude au service et de la sécurité à la fatigue sont ensuite examinés.

2. Démarche générale

2.1 Plans d'utilisation et de sécurité

Les plans d'utilisation et de sécurité sont prescrits par la norme SIA 160 [1] comme base du processus de dimensionnement de nouvelles structures. Il faut tout de suite préciser que de tels documents sont également indispensables pour effectuer l'évaluation d'une structure existante. Une discussion avec le maître de l'ouvrage est en effet indispensable pour bien définir le type d'utilisation encore prévu de la structure, ainsi que les exigences concernant son comportement. Le dialogue entre le maître de l'ouvrage, l'architecte et l'ingénieur est en effet particulièrement important, car ces derniers représentent pour le maître de l'ouvrage les conseillers dont il a besoin pour comprendre d'éventuelles modifications pratiques ou d'exploita-

tion de la structure. De plus, un tel dialogue renforcera certainement la motivation du maître de l'ouvrage dans sa responsabilité à faire appliquer et respecter d'éventuelles interventions.

Les conditions et les exigences discutées et définies avec le maître de l'ouvrage pour l'utilisation encore prévue de la structure sont à consigner dans le *plan d'utilisation*. Ce document est important pour l'établissement des directives ou des prescriptions qui seront à respecter par l'utilisateur de l'ouvrage. Il doit notamment contenir les renseignements suivants concernant l'utilisation encore prévue de la structure (cela concerne les questions d'aptitude au service) :

- le type de restrictions relatives à l'exploitation de l'ouvrage,
- l'ampleur et la fréquence d'inspections de certaines parties de la structure, ainsi que la façon de les interpréter et de transmettre leurs résultats,
- les conditions nécessaires pour qu'un expert soit consulté,
- les exigences relatives à d'éventuelles mesures *in situ*, ainsi que leurs valeurs limites, afin de permettre au maître de l'ouvrage d'être informé à temps d'éventuels travaux d'entretien ou de remplacement.

Le *plan de sécurité* servira ensuite de base à l'ingénieur responsable de l'évaluation, pour effectuer les différentes vérifications nécessaires afin de garantir la sécurité structurale et la sécurité à la fatigue de la structure.

2.2 Vérifications partielles

C'est sur la base des plans d'utilisation et de sécurité que les hypothèses nécessaires aux différentes vérifications vont pouvoir être définies. Tout comme pour le dimensionnement d'une nouvelle structure, l'évaluation d'un ouvrage existant doit se faire en

Par Peter Kunz
Ing. civil dipl.
EPFZ/SIA,
Dr sc. techn.
Department of
Civil Engineering
220 Civil/Electrical
Engineering
Building
University of Alberta
Edmonton, Canada
T6G 2G7

Rolf Bez, ing. civil
dipl. EPFL/SIA,
Dr sc. techn. EPFL
ICOM -
Construction
métallique
GC - Ecublens,
1015 Lausanne

Manfred A. Hirt,
professeur
Ing. civil dipl.
EPFZ/SIA,
Dr sc. techn. EPFL
ICOM -
Construction
métallique
GC - Ecublens,
1015 Lausanne

¹Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

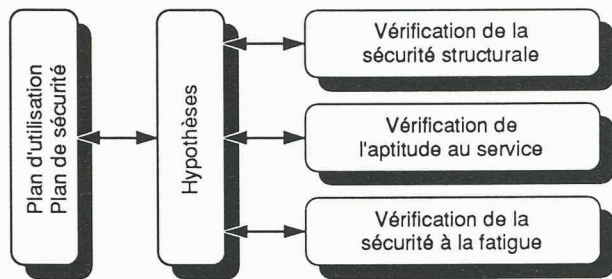


Fig. 1. – Démarche générale d'évaluation d'une structure existante

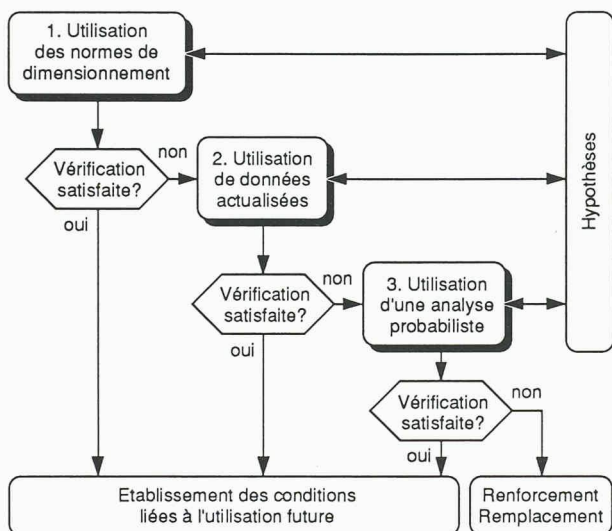


Fig. 2. – Principe d'évaluation par étapes, valable pour les vérifications de la sécurité structurale, de l'aptitude au service et de la sécurité à la fatigue

vérifiant sa sécurité structurale, son aptitude au service et, si nécessaire, sa sécurité à la fatigue. Chacune de ces vérifications partielles sera effectuée sur la base d'hypothèses distinctes, qu'il s'agit de comparer et de discuter, notamment avec le maître de l'ouvrage en ce qui concerne d'éventuelles restrictions d'utilisation ou interventions sur la structure. La figure 1 illustre l'ensemble que forment les différentes vérifications partielles ainsi que le caractère itératif du processus d'évaluation, dû à la remise en question possible des hypothèses effectuées sur la base des plans d'utilisation et de sécurité.

Toute évaluation de structure existante doit se faire sur la base d'une (ou de plusieurs) inspection(s) de l'ouvrage, qui doit permettre à l'ingénieur de se faire une idée globale de l'état de l'ouvrage évalué. Il est important à ce stade de rassembler les informations qui aideront l'ingénieur dans son évaluation et la définition des hypothèses nécessaires aux différentes vérifica-

tions, sans réunir trop d'informations superflues.

L'évaluation générale d'une structure existante consiste à effectuer chaque vérification partielle en tenant compte de son utilisation encore prévue, en général fortement influencée par les exigences du maître de l'ouvrage. Ce dernier doit donc être impliqué le plus tôt possible dans le processus d'évaluation, car il peut aider à préciser les hypothèses qui permettront éventuellement de définir les différents scénarios à étudier. Ajoutons que les résultats obtenus par une première évaluation vont remettre en question certaines des hypothèses faites, ce qui nécessitera une nouvelle évaluation de la structure: il s'agit là typiquement d'un processus itératif.

Chacune des vérifications partielles (sécurité structurale, aptitude au service et sécurité à la fatigue) fournira à l'ingénieur des informations distinctes mais complémentaires sur la durée de service restante de la structure. Comme ces indications sont souvent contradictoires, on aura recours à l'avis d'un ou de plusieurs experts pour être conseillé de façon adéquate. Selon les cas, on fera même intervenir des experts directement dans le processus d'évaluation générale. Pour des structures dont l'évaluation peut avoir des conséquences financières et d'exploitation importantes, il peut même être nécessaire de former un groupe d'experts pour établir les conclusions de l'évaluation générale. Un dialogue constant avec le maître de l'ouvrage est en tous les cas indispensable, car celui-ci doit être informé de façon claire sur les délais à respecter avant d'éventuels travaux d'entretien, de remplacement ou de démolition.

2.3 Evaluation par étapes

Il est recommandé d'effectuer chacune des vérifications par-

tielles selon les étapes suivantes (fig. 2):

1. Utilisation des normes de dimensionnement
2. Utilisation de données actualisées
3. Utilisation d'une analyse probabiliste

L'avantage d'un tel processus d'évaluation consiste à pouvoir affiner les hypothèses effectuées lors de chaque étape. Il est d'ailleurs utile de procéder ainsi pour chacune des vérifications partielles, pour lesquelles les hypothèses ne sont pas forcément identiques.

Comme cela a déjà été dit au paragraphe précédent, des inspections sont indispensables pour effectuer l'évaluation d'une structure. Une première inspection pourrait, par exemple, consister à comparer les plans et autres documents à disposition avec la réalité de l'ouvrage construit, afin d'identifier d'éventuelles différences. Une telle inspection, importante pour permettre de visualiser correctement la structure étudiée, doit être effectuée par l'ingénieur responsable de l'évaluation. Des inspections ultérieures seront éventuellement nécessaires au fur et à mesure de l'avancement du processus d'évaluation.

L'ingénieur peut assez facilement se faire une première idée de la structure à évaluer en utilisant les *normes de dimensionnement*. Une telle approche a souvent l'avantage de permettre d'identifier relativement rapidement les éléments de construction ou les sections critiques. Les facteurs de charge et de résistance utilisés lors de cette étape doivent être identiques à ceux qui sont prescrits dans les normes de dimensionnement, afin d'assurer la cohérence avec le concept de sécurité à la base des normes utilisées. Une exception à cela peut être envisagée pour le poids propre et les charges permanentes; on y reviendra au paragraphe 3.1.

L'utilisation de *données actualisées* constitue l'étape qui est probablement la plus utile à l'ingénieur responsable de l'évaluation. Les données concernant les actions, la résistance et le comportement de la structure doivent dans ce cas être définies sur la base des exigences d'utilisation convenues avec le maître de l'ouvrage, ainsi qu'à l'aide de mesures et d'essais effectués sur l'ouvrage. Il est important de faire intervenir le maître de l'ouvrage et si possible un expert lors de l'établissement de ces données actualisées, car leurs avis dépendent souvent de conditions qui sont à discuter. Les données actualisées serviront finalement de base aux différents états d'utilisation et situations de risque examinés lors de l'évaluation de la structure. Pour certains ouvrages particulièrement complexes, une *vérification probabiliste* peut éventuellement s'avérer utile. Les hypothèses de calcul nécessaires à ce type d'analyse nécessitent toutefois un effort important, basé souvent sur des mesures de longue durée sur la structure. Une approche probabiliste est également indispensable pour certains types de travaux de recherche ou de rédaction de normes, car c'est le seul moyen pour quantifier la fiabilité d'une structure ou pour fixer les valeurs des facteurs de charge ou de résistance à utiliser pour les vérifications déterministes [7] [8] [9].

3. Hypothèses de base pour les différentes vérifications

Les considérations de ce chapitre concernent essentiellement les vérifications faites avec les données actualisées, qui est l'étape du processus d'évaluation qui se prête particulièrement bien à une application pratique. Il faut préciser que les données actualisées pour l'évaluation d'une structure existante ne peuvent être établies que

très partiellement sur la base des normes de dimensionnement; des réflexions plus larges doivent en effet être effectuées dans beaucoup de cas.

Concrètement, il s'agit de définir les hypothèses concernant les charges et les actions, la résistance, et le comportement de la structure. Des mesures adéquates seront prises dans chacun de ces domaines, afin de s'assurer que les états d'utilisation et les situations de risque considérés correspondent effectivement à la réalité, notamment si les hypothèses admises diffèrent de celles des normes de dimensionnement.

3.1 Charges et actions

Lors de la définition des charges et des actions, outre les états d'utilisation et les situations de risque examinés, il est particulièrement important de bien définir les valeurs numériques des charges et des actions considérées, car elles peuvent être sensiblement différentes de celles admises lors du dimensionnement. On distinguera entre le poids propre et les actions permanentes, les actions climatiques et les actions variables.

Poids propre

et actions permanentes

Le poids propre et les actions permanentes peuvent être contrôlés et mesurés directement sur l'ouvrage. La détermination des dimensions et de la masse volumique des matériaux permet de définir ce type de charge avec une bonne précision.

La bonne connaissance du poids propre et des actions permanentes permet d'envisager une réduction des facteurs de charge correspondants, comme cela est prévu par la directive SIA 462 [4]. Il est alors indispensable de s'assurer qu'aucune modification de ces charges n'interviendra (par exemple par la pose d'un revêtement supplémentaire sur un pont ou la mise en place



Fig. 3. – Exemple de signalisation pouvant influencer les caractéristiques du trafic utilisant un ouvrage

d'éléments additionnels – porteurs ou non porteurs – dans un bâtiment) sans que l'ingénieur ne soit consulté.

Actions climatiques

Les actions climatiques, comme la neige ou le vent, peuvent souvent être définies avec une assez bonne précision, à l'aide de fonctions probabilistes établies sur la base de mesures statistiques périodiques. Elles peuvent de la sorte être considérées comme des variables aléatoires, dont la valeur représentative peut être déterminée en fonction de la durée de service restante prévue.

Une valeur représentative minimale, ou bien une durée de service restante minimale (par exemple 5 ans), doit cependant être fixée pour toute action climatique à caractère aléatoire, de façon à garantir un degré de sécurité suffisant de la structure. La définition de ces valeurs minimales devrait être faite par un expert compétent en la matière, car une large expérience est nécessaire, étant donné que ces valeurs ne dépendent pas uniquement de considérations statistiques.

Actions variables

Les hypothèses relatives aux actions variables doivent être discutées en détail avec le maître de l'ouvrage et l'utilisateur, en tenant notamment compte de l'utilisation effective actuelle et future de l'ouvrage. Les états

d'utilisation et les situations de risque correspondant aux différentes actions variables sont alors à établir en précisant clairement les hypothèses liées à chacune des vérifications partielles à effectuer ou aux valeurs représentatives admises.

Il est important de préciser que la vérification de la sécurité structurale doit se faire pour des états extrêmes. Les actions prépondérantes considérées doivent donc être des valeurs extrêmes, relativement rares, et de plus positionnées de façon défavorable. Les actions concomitantes à prendre en compte permettent de tenir compte du fait que le maître de l'ouvrage n'a souvent pas un contrôle absolu de l'utilisation de l'ouvrage. Des situations exceptionnelles ou accidentelles doivent également être considérées.

Une modification des valeurs représentatives données par les normes de dimensionnement ne devrait être admise que si des mesures adéquates sont prises. De telles mesures peuvent par exemple consister à contrôler plus intensément l'utilisation de l'ouvrage, à l'inspecter plus fréquemment ou à mettre en place une signalisation (fig. 3) ou un système d'alarme. Si cela est possible, il est recommandé de prendre des dispositions de construction durables, pour éviter que des situations de risque non désirées ne se produisent; pour les ponts-routes, il est par exemple possible de diminuer la largeur utilisable de la chaussée pour éviter le croisement de poids lourds, si celui-ci doit être exclu.

On remarquera qu'il y a lieu de bien étudier l'opportunité de la pose d'une signalisation limitant les charges maximales admises. L'aspect juridique d'une telle restriction est à préciser soigneusement avec le maître de l'ouvrage, pour clarifier notamment la responsabilité en cas de non-observation. Une procédure

d'évaluation d'éventuelles demandes de dérogation est également à mettre sur pied, et une personne compétente doit être désignée pour examiner les cas particuliers nécessitant encore une étude complémentaire.

Pour la vérification de l'aptitude au service, il faut considérer les actions prévues dans le futur à leur valeur fréquente, par exemple moyenne (éventuellement pondérée). Pour l'évaluation de la sécurité à la fatigue, il est par contre nécessaire de faire intervenir les valeurs des charges passées et futures.

3.2 Résistance

Les hypothèses relatives à la résistance concernent essentiellement les caractéristiques des matériaux et les dimensions des sections transversales. On mentionnera également la modélisation de la résistance en section, qui sera en général identique à celle admise lors du dimensionnement.

Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques des matériaux peuvent être, dans un premier temps, admises comme étant égales à celles prescrites par les normes de dimensionnement valables lors de la réalisation de l'ouvrage. Il est toutefois possible de déterminer les caractéristiques des matériaux sur la base d'échantillons prélevés sur la structure. Il est alors nécessaire d'effectuer un nombre suffisant d'essais, de façon à avoir à disposition un échantillon de valeurs statistiquement représentatif. La valeur de calcul des caractéristiques des matériaux doit tenir compte du nombre d'essais effectués.

Il est possible de déterminer la valeur d'une caractéristique des matériaux de façon à ce qu'elle corresponde à un fractile identique à celui qui a été utilisé pour la définition de la valeur de dimensionnement, à condition qu'une analyse statistique étendue ait été effectuée. Les va-

leurs ainsi obtenues sont souvent plus élevées que celles qui sont prescrites dans les normes de dimensionnement, ce qui est favorable pour l'évaluation de la structure. Si l'on constate sur l'ouvrage des problèmes pouvant affecter sa durabilité (carbonatation du béton, par exemple), on réduira les valeurs des caractéristiques des matériaux pour tenir compte de ce type de problème.

Dimensions

des sections transversales

A part les caractéristiques des matériaux, il est également important de connaître les dimensions des sections transversales. En effectuant plusieurs mesures, il est possible de comparer les dimensions effectives des différents éléments de la section transversale avec celles des plans. Les caractéristiques permettant de déterminer la résistance des sections transversales, comme par exemple le moment de résistance, peuvent alors être établies avec leurs dimensions effectives, qui doivent tenir compte d'éventuelles réductions de section, dues par exemple à la corrosion de l'acier ou à l'éclatement du béton.

3.3 Comportement de la structure

Le comportement de la structure à évaluer peut sembler, de prime abord, facile à saisir. Cela n'est malheureusement pas souvent le cas, car le comportement réel peut être très différent de celui qui est basé sur une modélisation, faite habituellement de façon assez simplifiée. Un moyen très efficace pour se faire une idée plus précise du comportement réel de la structure sous charges de service ou de fatigue consiste à mettre en place des jauges extensométriques permettant de connaître le niveau des contraintes à des endroits importants.

Prenons l'exemple d'une ancienne poutre en treillis, dont

les nœuds sont en général admis comme étant des articulations parfaites. Si l'on considère le comportement effectif des nœuds, on constatera que leur capacité de rotation est souvent réduite à cause du frottement entre les différentes pièces de l'assemblage ou à cause d'un effet d'encastrement partiel. Cette réduction de rotation peut éventuellement être accentuée par une modification de l'état de surface, dû à de la corrosion, ou par la présence d'une précontrainte. Si ces phénomènes n'influencent pas sensiblement le comportement général de l'ouvrage, ils peuvent être déterminants lorsqu'il s'agit d'évaluer les contraintes agissant dans la région des nœuds ou pour la vérification d'un élément particulier de la structure.

Des mesures de contraintes ou de déformations sont donc à conseiller fortement lors de l'évaluation d'une structure avec des données actualisées (étape 2), tout au moins pour obtenir une meilleure idée de la validité des calculs numériques effectués, car ces derniers donnent trop souvent l'impression d'une très grande précision. De telles mesures n'offrent cependant que peu de renseignements concernant le comportement de l'ouvrage sous charges extrêmes correspondant à l'état de chargement lié à l'évaluation de la sécurité structurale. C'est ainsi qu'à l'état limite ultime, des nœuds dont la capacité de rotation était limitée pour des charges de service peuvent à nouveau se comporter comme des articulations quasi parfaites. Ces quelques considérations mettent en évidence que le comportement de l'ouvrage doit donc être examiné avec beaucoup de soin, mais également avec un esprit critique, notamment en ce qui concerne la planification et l'interprétation des résultats de mesures.

4. Vérification de la sécurité structurale

Lors de la détermination des situations de risque à examiner pour vérifier la sécurité structurale, il est important de définir, en particulier pour les actions climatiques (§ 3.1) et pour les charges de trafic, la durée de service encore prévue. L'évaluation de la structure se fera donc pour une durée de service restante limitée, par exemple dix ans, ce qui nécessitera de procéder à une nouvelle évaluation avant la fin de cette période. Une telle procédure peut souvent permettre de garder en service un ouvrage durant encore plusieurs dizaines d'années; c'est pour cette raison qu'il est important de fixer une valeur minimale de la durée de service restante, tout en la reliant à des conditions de surveillance et à l'obligation d'effectuer en temps voulu une nouvelle évaluation.

La détermination et l'évaluation des différentes situations de risque nécessite un échange d'idées avec le maître de l'ouvrage et l'utilisateur, comme cela a déjà été mentionné au chapitre 2. Il est particulièrement important de discuter des interventions pouvant avoir une influence déterminante sur l'utilisation de l'ouvrage et sur les situations de risque à examiner, comme par exemple une limitation de charge. Pour résoudre certaines questions particulières, il sera parfois nécessaire de consulter un ou plusieurs experts.

La vérification de la sécurité structurale consiste en général à déterminer et comparer les efforts intérieurs ou les contraintes correspondant aux situations de risque examinées, afin d'identifier les éléments porteurs et les sections transversales critiques. Pour effectuer cette comparaison, il peut par exemple être intéressant de déterminer le rapport R_d/S_d entre

la valeur de dimensionnement de la résistance et celle des sollicitations pour les différents éléments et sections étudiés.

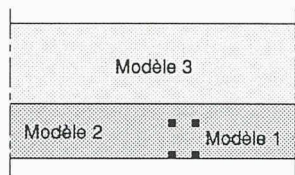
Précisons encore que des situations accidentelles ou exceptionnelles doivent également être considérées lors de l'établissement et de la comparaison des différentes situations de risque. Pour les ponts, il peut par exemple être nécessaire de prévoir la mise en place d'une grue d'un certain tonnage sur le bord de la chaussée, tandis que pour les bâtiments, on tiendra par exemple compte des travaux relatifs au remplacement des éléments de façade ou d'une situation de déménagement. De tels états de charge correspondent à des dispositions de charge qui ne se produiront que très rarement, voire jamais, durant la durée de service restante de l'ouvrage.

Pour que le degré de sécurité de la structure évaluée corresponde à celui de nouvelles structures, il faut utiliser les mêmes facteurs de charge et de résistance que ceux prévus lors du dimensionnement. On pourra faire une exception pour le poids propre et les charges permanentes, pour autant qu'il s'agisse d'actions qui sont contrôlées et surveillées (§ 3.1).

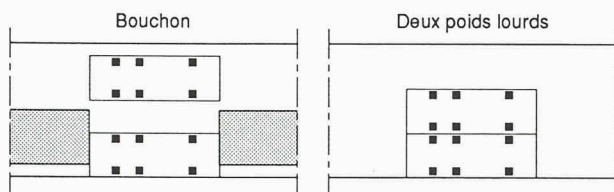
Exemple

Nous avons été chargés d'étudier, à l'ICOM, le cas particulier des ponts-routes existants à deux voies de circulation, d'une largeur totale de 8 m et d'une portée de 2 à 50 m. Le maître de l'ouvrage nous a demandé d'examiner les états de trafic suivants: trafic sans restriction (28 t de charge totale pour les poids lourds), limitation de la charge totale des poids lourds à 16 t, distance minimale imposée entre poids lourds, restriction ou empêchement du croisement de poids lourds.

Nous avons examiné, pour chaque état de trafic, l'influence



(a) Selon norme SIA 160 (1989).



(b) Données actualisées pour un trafic sans restriction (28 t).

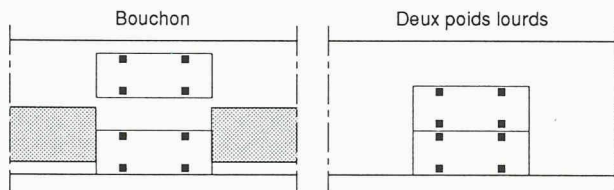


Fig. 4. – Situations de risque à considérer pour des ponts-routes existants à deux voies de circulation

des situations de risque suivantes: passage d'un poids lourd surchargé (à 40 t de charge totale), collision entre deux poids lourds, croisement d'un poids lourd surchargé avec un poids lourd chargé à un niveau moyen, panne d'un poids lourd nécessitant un remorquage, et finalement, bouchon sur une voie avec croisement d'un poids lourd chargé à un niveau moyen. Ces cinq différentes situations de risque, appliquées aux quatre états de trafic examinés, nous ont fait étudier un total de vingt situations de risque différentes.

Une comparaison de ces vingt scénarios nous a permis de faire une synthèse pour l'évaluation de la sécurité structurale, pour laquelle il suffisait de n'en considérer finalement que deux, à savoir les cas du bouchon sur une voie avec croisement d'un poids lourd chargé à un niveau moyen ou de deux poids lourds en position défavorable. La figure 4 permet une comparaison qualitative entre les situations de risque à considérer pour le dimensionnement selon la norme SIA 160 (fig. 4a), et celles correspondant aux deux cas finalement retenus pour les états de trafic sans restriction (fig. 4b) ou avec une limitation du poids total à 16 t (fig. 4c). Les valeurs numériques correspondant à ces différentes situations de trafic seront pu-

bliées d'ici à la fin de l'année 1994, car cela constitue un des principaux objectifs de notre recherche dans ce domaine.

5. Vérification de l'aptitude au service

La vérification de l'aptitude au service doit se faire selon une approche différente de celle de la vérification de la sécurité structurale, car beaucoup d'exigences à respecter dépendent du temps. Elle constitue de ce fait un critère important pour la définition de la durée de service restante. On distinguera entre les questions relatives à l'aptitude au fonctionnement, à la durabilité et à l'aspect de la structure.

La grandeur des tassements, des déformations, des vibrations ou l'efficacité de l'isolation acoustique sont des critères importants pour évaluer l'aptitude au fonctionnement de l'ouvrage, notamment en matière de confort de l'utilisateur. Les valeurs limites indiquées dans les normes correspondent en général à un sentiment agréable de l'utilisateur. Il n'est cependant pas raisonnable d'appliquer les mêmes exigences à l'ensemble des structures existantes, car cela pourrait avoir des conséquences financières trop élevées (amortissement difficile ou intérêts trop grands). Il est donc particulièrement important que le ou les experts compétents dans ce domaine définissent les interventions nécessaires d'entente avec le maître de l'ouvrage et éventuellement les utilisateurs.

La durabilité d'une structure existante est influencée par des phénomènes tels que par exemple la corrosion, l'abrasion, le gel ou les attaques chimiques (sels de déglacage). À la différence d'un nouvel ouvrage, on évaluera la durabilité d'une structure existante en tenant compte de la durée de service restante encore prévue, ce qui

peut permettre de réduire les exigences correspondantes à respecter. On fera particulièrement attention aux cas où les phénomènes agissant sur la durabilité influencent la sécurité de la structure: il faudrait alors procéder à la vérification de la sécurité structurale de l'ouvrage compte tenu de ces effets. L'aspect d'une structure est essentiellement influencé par des fissures ou des déformations, dont l'origine est à établir, afin de s'assurer qu'il ne s'agit pas de phénomènes pouvant affecter la durabilité de la structure ou mettre en cause sa sécurité structurale.

6. Vérification de la sécurité à la fatigue

La fatigue est un phénomène de dommage progressif pouvant mener une structure à la ruine, sous des conditions de charges répétées qui, individuellement, ne posent aucun problème à celle-ci. La sécurité à la fatigue des structures existantes doit être vérifiée avec beaucoup de soin, car il est extrêmement difficile de détecter des fissures de fatigue ou d'estimer des dommages de fatigue. En raison de leur croissance exponentielle, les fissures ne peuvent souvent être détectées que peu avant la rupture du détail de construction dans lequel elles se trouvent. La sécurité à la fatigue est pourtant souvent le seul critère permettant de quantifier la durée de service restante.

On distinguera deux étapes pour l'évaluation de la sécurité à la fatigue de détails de construction en béton armé ou d'éléments en béton, à savoir, premièrement, l'identification des détails de construction critiques et, deuxièmement, la détermination de la durée de service restante.

Identification des détails de construction critiques

L'intensité des contraintes appliquées constitue le paramètre le

plus important pour l'identification du détail de construction critique. Pour les éléments en acier, c'est la différence de contraintes $\Delta\sigma$ due aux charges de fatigue qui est déterminante, tandis que pour les éléments en béton, ce sont les contraintes maximales dues au poids propre, aux charges permanentes et aux charges de fatigue. La résistance à la fatigue du détail de construction examiné est par ailleurs influencée directement par le nombre de cycles de charge auquel il est soumis.

Pour pouvoir identifier, par exemple à l'aide des tableaux définis par la norme SIA 161 [2], la catégorie d'un détail de construction en acier, il est nécessaire d'analyser avec précision le cheminement des efforts dans cet élément. Une inspection de l'ouvrage ou des mesures *in situ* sont souvent une aide déterminante, non seulement pour l'identification de la catégorie du détail de construction, mais également pour l'établissement de la durée de service restante.

De façon analogue à la vérification de la sécurité structurale (chap. 4), il peut être intéressant de déterminer, sur la base des normes de dimensionnement de la SIA le rapport $R_{d,fat}/S_{d,fat}$ entre la résistance à la fatigue et la sollicitation de fatigue de chaque détail de construction, afin d'identifier celui ou ceux qui sont critiques. La durée de service restante des détails de construction ayant le plus petit rapport $R_{d,fat}/S_{d,fat}$ est alors à déterminer en tous les cas. Une telle procédure permet à l'ingénieur d'établir la liste de priorité des détails critiques.

Détermination de la durée de service restante

La détermination de la durée de service restante nécessite des hypothèses concernant les caractéristiques des trafics passé et

futur. Celles-ci permettent ensuite d'établir l'historique des contraintes de chaque détail de construction étudié à l'aide de leurs lignes d'influence. La durée de service restante peut finalement être obtenue à l'aide d'un calcul du cumul des dommages. Cette procédure n'est pas très satisfaisante si elle est limitée à un calcul déterministe. C'est pourquoi une approche probabiliste est fortement conseillée, même si elle implique des calculs plus complexes et plus longs. La figure 5 montre par exemple le type de relation qu'il est possible d'établir entre l'indice de fiabilité β d'un détail de construction et le nombre de cycles de charge N_{futur} pouvant encore être appliqués lors de la durée de service restante. La mise au point d'une procédure probabiliste facilement accessible à chaque ingénieur est actuellement en développement et sera bientôt à disposition des praticiens.

Une vérification complète de la sécurité à la fatigue nécessite des calculs comparatifs détaillés, notamment en ce qui concerne l'influence des différentes hypothèses relatives aux charges, au nombre de passages et au cumul des dommages. Il est également nécessaire d'étudier l'influence, sur la durée de service restante, de certaines interventions concrètes sur le trafic ou la structure. C'est ainsi que l'ingénieur peut valablement informer le maître de l'ouvrage, d'une part sur la sécurité à la fatigue de la structure, d'autre part, sur les interventions les plus utiles pour augmenter sa durée de service restante.

Exemple

Nous avons étudié, à l'ICOM, le pont de chemin de fer sur le Rhin de Hemishofen, datant de 1875 (fig. 6), réalisé en fer puddlé avec des portées de 57 m, 2×70 m et 57 m. Le maître de l'ouvrage, en l'occur-

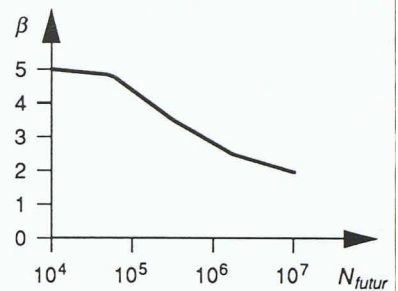


Fig. 5. — Relation schématisée entre indice de fiabilité β et nombre de cycles de charge N_{futur} pouvant encore être appliqués

rence les Chemins de fer fédéraux (CFF), se demandait si ce pont satisfaisait toujours aux exigences actuelles et s'il pouvait être utilisé dans le futur pour un trafic de ferroutage.

Une première évaluation a démontré que la sécurité structurale de l'ouvrage était satisfaisante, mais que la sécurité à la fatigue n'était pas conforme aux normes de dimensionnement actuelles. En déterminant le rapport $R_{d,fat}/S_{d,fat}$ de différents détails de construction, un calcul de la résistance à la fatigue selon la norme SIA 161 [2] a révélé que certaines zones attenantes aux nœuds étaient critiques. Ce sont ces endroits qui ont été examinés plus en détail. L'annuaire statistique des CFF a permis de déterminer le tonnage transporté dans le passé sur cette ligne. Les sollicitations passées et futures nécessaires pour effectuer l'évaluation de la sécurité à la fatigue de la structure ont pu, quant à elles, être établies sur la base des trains types définis par l'Union internationale des chemins de fers (UIC).

Il a ainsi pu être démontré, sur la base d'un calcul de cumul des dommages utilisant à la fois une approche probabiliste et les plus récentes connaissances dans le domaine de la mécanique de la rupture, que ce pont pouvait être utilisé pratiquement sans restriction par un trafic marchand normal durant les vingt prochaines années. Par contre, un remplacement du pont devait être envisagé d'ici dix ans si l'on souhaitait l'utiliser pour un trafic de ferroutage. Les études effectuées nous ont également permis de conseiller au maître de l'ouvrage d'effectuer une inspection annuelle des détails de



Fig. 6. – Pont sur le Rhin de Hemishofen (1875)

construction critiques, afin d'en diminuer le risque de rupture fragile.

7. Conclusions

L'évaluation détaillée d'une structure existante représente une tâche complexe qui constitue un défi nouveau pour l'ingénieur civil. On retiendra des considérations ci-dessus les éléments principaux suivants.

- Le maître de l'ouvrage doit prendre part périodiquement et dès le début au processus d'évaluation d'une structure existante. C'est en effet lui qui doit définir les exigences correspondant à l'utilisation encore prévue et qui serviront de base aux différentes vérifications à effectuer. Cela lui permettra également de bien comprendre les raisons d'éventuels travaux de maintenance, de réparation ou de remplacement partiel ou total.
- Les plans d'utilisation et de sécurité constituent une base indispensable à l'évaluation d'une structure existante. En définissant la disposition et la fréquence des charges à considérer, ils permettent en effet d'établir les hypothèses

nécessaires à l'établissement des états d'utilisation et des situations de risque à considérer. Ils constituent donc des documents de référence indispensables pour les différents calculs de vérification.

- Les exigences relatives à l'utilisation encore prévue de l'ouvrage doivent figurer dans le plan d'utilisation, au même titre que le type, la fréquence et le principe de dépouillement d'éventuelles inspections.
- L'évaluation de la structure comprend les vérifications de la sécurité structurale, de l'aptitude au service et de la sécurité à la fatigue. Chacune de ces vérifications doit fournir des éléments permettant de préciser la durée de service restante de la structure. Précisons toutefois que si cette dernière peut être obtenue comme résultat de l'évaluation, elle peut également en constituer la base.
- Il est recommandé de procéder à l'évaluation d'une structure existante par étapes durant lesquelles les données ayant le plus d'influence sur le résultat seront affinées. C'est dans ce but

que des mesures *in situ* ou des méthodes d'analyse performantes sont parfois à appliquer.

- La durée de service restante peut souvent être prolongée par des interventions adéquates. La détermination de la durée de service restante d'une structure est donc un processus itératif dans lequel un échange d'idées avec le maître de l'ouvrage est très important.

Bibliographie

- [1] SIA 160: «Actions sur les structures porteuses», Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1989
- [2] SIA 161: «Constructions métalliques», Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1990
- [3] SIA 162: «Ouvrages en béton», Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1993
- [4] SIA 462: «Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke», SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, à paraître en 1994
- [5] IP Bau: «Zustanduntersuchung an bestehenden Bauwerken», Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1992 (Nr. 724.456 d)
- [6] IP Bau: «Die Erhaltung der Tragsicherheit», Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, à paraître en 1994
- [7] BEZ, R.: «Modélisation des charges dues au trafic routier», EPFL, Lausanne, 1989 (thèse N° 793)
- [8] PETSCHACHER M.: «Zuverlässigkeit technischer Systeme», ETHZ, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich, 1993 (Bericht Nr. 199)
- [9] KUNZ, P.: «Probabilistisches Verfahren zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit bestehender Brücken aus Stahl», EPFL, Lausanne, 1992 (thèse N° 1023)