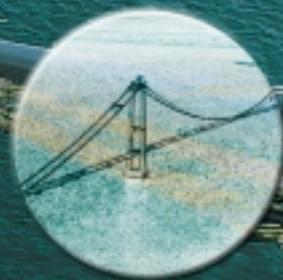


OUVRAGES D'ART

CENTRE DES TECHNIQUES D'OUVRAGES D'ART



Bulletin de liaison diffusé par
le Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art
du Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes



N° 32
Juillet 1999

Incidents, Confortements, Réparations

- Le S.I.N.G.E. *page 3*
G. DELFOSSE

Techniques Particulières

- L'analyse par spectromètre optique par étincelage portable : un essai non destructif intéressant *page 8*
M. DELANNOY
- Pont sur le Rhin entre Eschau et Altenheim Les études hydrauliques sur modèle réduit physique des appuis dans le fleuve *page 10*
G. TREFFOT

Equipements et Entretien

- L'asphalte coulé pour revêtement de ponts à tablier métallique Exemple du pont suspendu du Storebelt au Danemark *page 17*
H. AESCHLIMANN
- Barrières de sécurité : les nouvelles normes NF EN 1317-1 et 2 *page 23*
M. FRAGNET

Réglementation, Calculs

- Etude du comportement vibratoire des passerelles lors du passage de piétons *page 26*
F. LÉGERON, M. LEMOINE
- Calcul au flambement des arcs Comparaison entre un calcul approché et un calcul en grands déplacements *page 34*
J. GUAL, F. ROBERT

Qualité, Gestion, Organisation

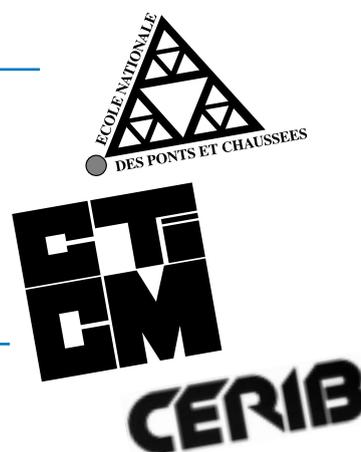
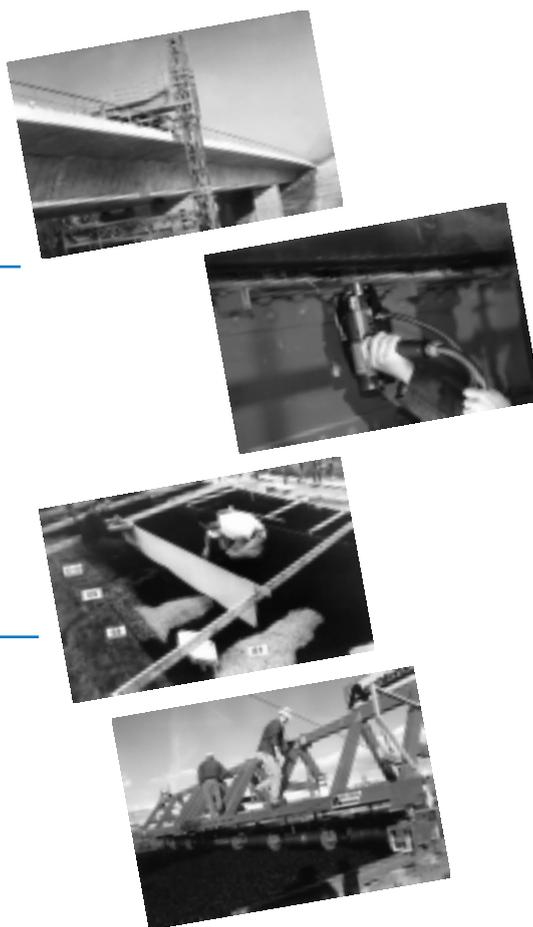
- Protection anticorrosion des structures métalliques *page 37*
G. MAIRE, J. FUCHS, D. ANDRE, J. BERTHELLEMY
- Un nouveau produit informatique de gestion des ouvrages d'Art *page 43*
G. DELFOSSE

Informations Brèves

- Web du Setra *page 44*
- Stages ENPC, CTICM, CERIB *page 46*

Le Kiosque du Setra

- Les dernières publications Ouvrages d'Art *page 48*



Le S.I.N.G.E.

Le département de la Charente Maritime développe un outil original, conçu pour l'inspection et la réparation des piles de grande hauteur, baptisé S.I.N.G.E. (Système Indépendant Navigant et Grimant d'Entretien)



Pont de l'île de Ré

Des besoins spécifiques, mais pas uniques

Le département de Charente Maritime, de par sa configuration littorale particulière, a développé une politique de liaison des îles et de franchissement des grandes brèches par des ouvrages exceptionnels. Au rang de ces derniers, les ponts d'Oléron, de Seudre, de Ré et de Charente constituent un patrimoine unique, mettant en jeu un investissement considérable. À titre indicatif, on peut estimer la valeur patrimoniale de ces ouvrages à environ 1 200 MF.

Ces grands ouvrages, situés en site maritime ou fluvial, franchissent les brèches au moyen de nombreuses piles de grande hauteur. Plus de 85 de ces appuis dépassent trente mètres de hauteur et sont situés en site aquatique.

Supportant le tablier et la circulation, les piles constituent un maillon essentiel dans la chaîne permettant le franchissement. Tout désordre significatif affectant une pile est susceptible de rendre l'ouvrage impropre à assurer ces fonctions. Il convient donc de surveiller et d'entretenir particulièrement ces appuis.

Les quelques campagnes d'investigations portant sur ces parties d'ouvrages ont révélé que, quelque soit l'ouvrage, elles nécessitent des

interventions de type ragréage, passivation d'acier, injections de fissures, etc.

Les outils existants

■ la passerelle négative

Les outils traditionnellement employés dans le domaine de l'inspection des piles de grande hauteur sont développés autour de la passerelle négative. Mais, malgré le recours fréquent à cet outil, ces inconvénients sont à noter :

Passerelle négative



- **sensibilité au vent** : en effet, dès que le vent dépasse les limitations d'emploi du matériel, ce dernier est condamné à l'immobilisation. Or, les valeurs de vent limites sont des valeurs fréquemment atteintes (souvent de l'ordre de 45 km/h). Il faut également souligner que ces valeurs sont d'autant plus sensibles que les ouvrages possédant des appuis de grande hauteur sont souvent situés sur des brèches qui constituent des "couloirs à vent" (effet Venturi). De plus, la présence même de l'ouvrage renforce localement la force du vent.
- **exploitation de la route** : les passerelles nécessitent d'empiéter sur la partie circulée de la chaussée. Si cette gêne peut être limitée une fois l'engin mis en place, il en va autrement pendant les déplacements. Des interruptions de circulation sont nécessaires sur les ouvrages à largeur roulable limitée. En outre, concernant certains ouvrages (comme le pont sur la Seudre) la résistance à la flexion transversale n'est pas toujours assurée du fait d'un dimensionnement des encorbellements trop juste.
- **capacité d'observation** : les passerelles négatives, évoquées plus haut ne permettent guère d'atteindre des niveaux situés en dessous de 8 à 10 mètres sous la chaussée. Ceci signifie une hauteur observable pour la pile n'excédant pas 4 à 6 mètres, compte tenu de la hauteur du tablier sur appui. Les nacelles individuelles suspendues par des treuils sous les passerelles sont de nature à combler cette lacune, en permettant une descente sur toute la hauteur de la pile. Mais, ceci est limité par une sensibilité au vent encore plus impor-

tante que pour la passerelle elle-même, et une vision très partielle de l'appui. Seule les faces au regard de la nacelle pourront être appréciées, et encore dans la limite de la largeur de la nacelle ou des possibilités de débatement des treuils. En tout état de cause, les faces parallèles à l'axe général de l'ouvrage ne pourront être observées par cette méthode. Notons également que ces petites nacelles suspendues interdisent toute action de travaux, vu leur faible capacité portante.

- Citons également pour mémoire **les outils optiques**. Ces derniers permettent une appréciation uniquement qualitative de l'état d'un appui, sous réserve de limiter les portées optiques à une soixantaine de mètres et de disposer de bases de pose des appareils particulièrement stables. Ces moyens ne permettent pas de relever les ouvertures de fissures, ni même d'établir une cartographie précise des désordres, par manque de système de repérage. Ils ne permettent évidemment pas de marquer les désordres sur l'ouvrage, ce qui est pourtant fréquemment demandé lors des inspections détaillées.

■ Epsilon : l'outil spécifique du laboratoire de Lyon

Cet engin, spécialement conçu pour la visite des ponts en arc, est constitué des 2 chariots automoteurs supports d'une passerelle traditionnelle. Cette disposition présente l'avantage de pouvoir inspecter la totalité de la hauteur des appuis et des intrados d'ouvrages importants. Mais, il n'est pas sans présenter quelques inconvénients : difficultés d'exploitation liées à la présence de candélabres impliquant des opérations de démontage et de remontages fréquentes, empiètement sur les deux côtés de la voie supportée relativement faible, mais suffisant pour nécessiter des mesures de restriction de circulation, sensibilité au vent (45 km/h), pas de possibilité d'inspection ni de travaux sur les faces parallèles à l'axe de l'ouvrage, coût de location et d'immobilisation important.

■ Les échafaudages

Ils répondent particulièrement bien aux fonctions attendues en matière d'actions de surveillance et de travaux mais ils présentent deux inconvénients majeurs : ils sont longs à monter et donc chers, le coût est disproportionné au

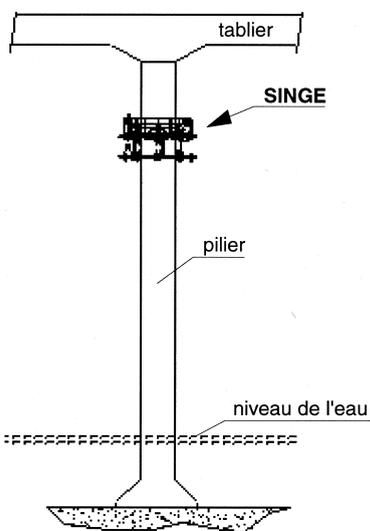
Epsilon



regard d'une simple action d'inspection. De plus, il n'est pas aisé de les mettre en œuvre en site fluvial ou maritime.

L'outil original et ses principes

Devant la nécessité de surveiller et d'entretenir avec le même soin que le reste ces parties d'ouvrages, besoins rappelés au premier paragraphe, il a été développé l'idée d'un outil original qui s'affranchirait de toute attache sur le tablier. L'idée est née de la confrontation des besoins en terme d'outils d'inspection et des difficultés à inspecter correctement les piles de grandes hauteur, exprimée par G. Delfosse et du savoir-faire de J.-M. Tessier, œuvrant dans le domaine de la conception des systèmes de transport de personnes : attraction de parc de loisirs, ascenseurs inclinés, de puits de mine, de chantier (Fréjus : 700 m)



Le département de Charente Maritime, sensibilisé sur la nécessité de surveiller et d'entretenir un patrimoine exceptionnel a tout de suite encouragé la démarche innovante et confié les études d'avant projet à Jean-Marc Tessier, Gérard Delfosse réalisant la conduite d'opération.

Le principe est celui d'un outil automoteur se fixant et s'élevant sur la pile, en prenant appui sur celle-ci.

L'outil est constitué de deux plates-formes reliées par quatre vérins. Chaque plate-forme est équipée de quatre systèmes à coins (opposés deux à deux) qui assurent le "clampage" sur le pilier de l'ouvrage.

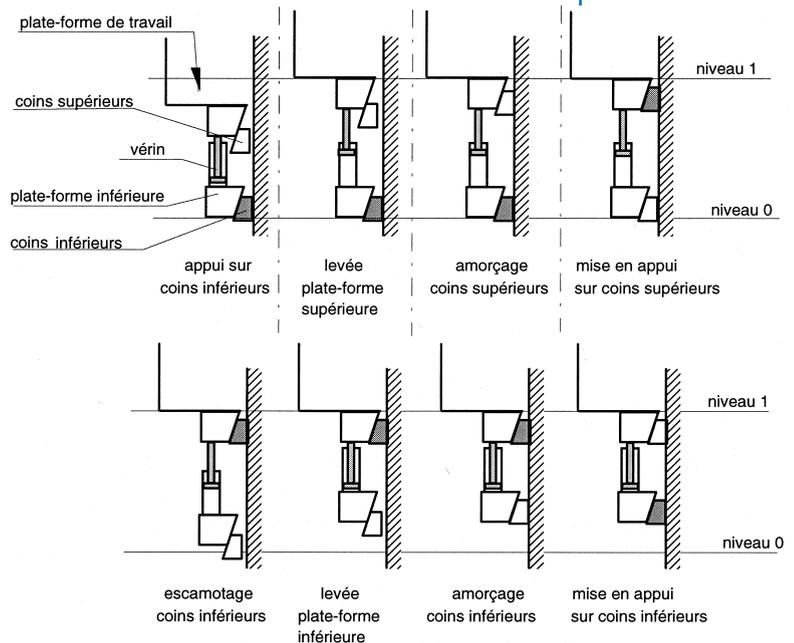
Lorsqu'une plate-forme est fixée sur le pilier, l'autre est soulevée par les vérins puis vient se coincer à son tour...

La plate-forme supérieure est équipée d'une passerelle de travail faisant le tour du pilier.

L'ensemble est motorisé par une centrale hydraulique elle-même animée par un moteur thermique.

La vitesse de déplacement attendue est de l'ordre du mètre par minute, ce qui est suffisant pour effectuer un relevé de désordres correct.

Les plates-formes sont décomposées en modules de base (portant les coins), et en modules

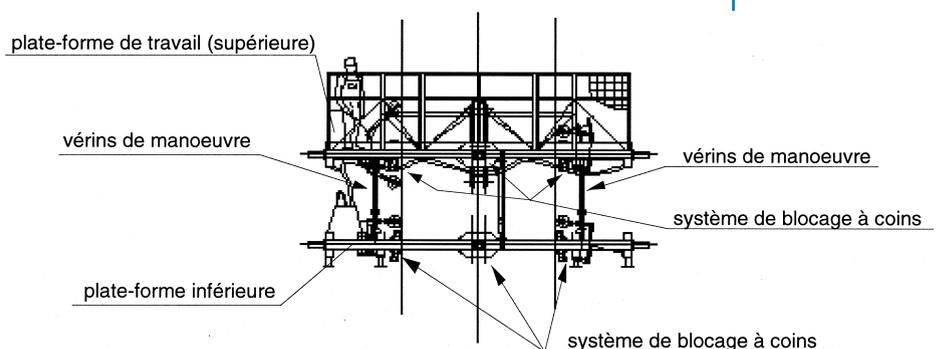


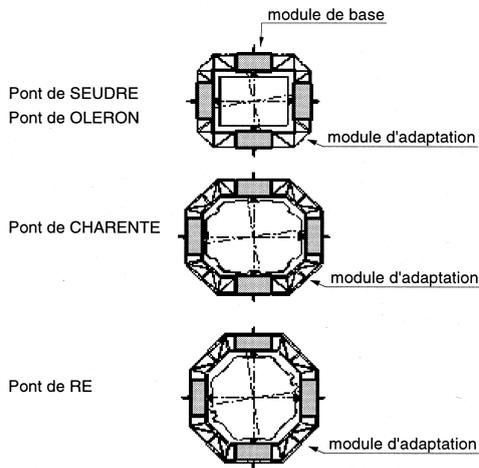
d'adaptations spécifiques à chaque forme de pilier (voir page suivante).

Les matériaux prévus sont essentiellement l'acier galvanisé, pour la charpente; les planchers de travail étant réalisés en caillebotis d'aluminium ou matériaux composites.

Cet outil est une machine au sens de l'article R 233-83 du code du travail. Elle génère des risques de chute verticale supérieure à trois mètres. Elle fera donc l'objet d'un "examen CE de type" au sens des articles R 233-54 à R 233-65 du code du travail. Cet examen sera réalisé par le C.E.T.I.M. qui est un "organisme notifié" pour ce genre d'examen.

L'examen "CE de type" repose sur l'analyse des risques. Le système est conçu dans le strict respect du critère de sécurité intrinsèque. Ce critère s'exprime de la façon suivante, "la défaillance





d'un composant contribuant à la sécurité de la machine, ne doit pas mettre la machine dans un état contraire à la sécurité ou doit arrêter la machine ". Ainsi chaque plate-forme est dimensionnée pour garantir le "clapage " du système avec seulement deux des quatre coins, la plate-forme supérieure est muni d'un dispositif de sauvetage qui permettra l'évacuation du plan-

cher de travail en cas de panne de moteur. Les avantages à retenir de ce dispositif sont les suivants :

- aucune sensibilité au vent : des limites d'utilisation existent, mais elles sont liées soit à la réglementation du travail, soit à l'agitation du plan d'eau pendant le déplacement d'une pile à l'autre.
- outil permettant d'inspecter et de travailler tout autour de la pile.
- capacité de charge embarquée importante : 1 000 kg, permettant tous les travaux d'entretien, comme ceux évoqués au premier paragraphe du présent rapport.
- aucune interférence avec la circulation routière.

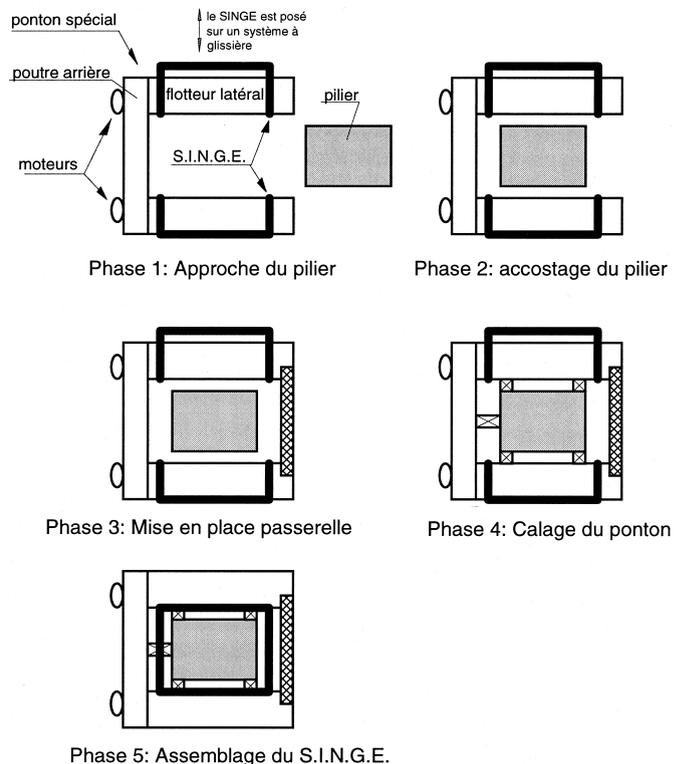
La mise en œuvre

Principalement conçu pour les appuis en milieu hydraulique (mais pas exclusivement pour ceux-ci), le S.I.N.G.E. sera mis en œuvre à partir d'un ponton spécialement développé à cet effet

Le ponton est composé de trois éléments principaux : deux flotteurs latéraux coulissent sur une poutre arrière. Le ponton navigue, à l'aide de deux moteurs hors bord, en supportant le S.I.N.G.E. pré-assemblé en deux parties. À l'approche de la pile, on vient encercler cette dernière et verrouiller le ponton autour de la pile, par un calage sommaire et la fermeture du ponton par une passerelle avant. Dès le premier

mouvement du S.I.N.G.E. le ponton devient indépendant et en prenant la précaution d'enlever le calage qui le bloque autour de la pile, ses mouvements s'effectueront autour de la pile, au gré des variations de hauteur du plan d'eau.

Le changement de pile s'effectue par descente sur le ponton, division du S.I.N.G.E. en deux demi-éléments, puis navigation au moteur jusqu'au prochain appui



En site terrestre, on procède par transport au camion-plateau des deux demi-éléments pré assemblés, puis après disposition autour de la pile à l'aide d'un engin de manutention simple, (grue attenante au camion de transport, ou engin de levage type élévateur) on assemble le S.I.N.G.E.

Ces assemblages s'effectuent par boulon HR à serrage contrôlé. Ils sont réalisés en atelier en ce qui concerne les pièces particulières d'adaptation à disposer pour adapter l'engin à la géométrie particulière de la pile (opération à réaliser une seule fois par ouvrage), ou à chaque changement de pile pour réunir les deux demi-parties.

L'exploitation



L'exploitation du S.I.N.G.E sera simple. Elle sera confiée à deux agents ayant reçu une formation à l'utilisation de l'outil. Il sera hautement souhaitable que ces agents aient également reçu une formation en relevé de dégradation, voire en pathologie du béton. De plus, ils devront avoir été formés à l'utilisation du descendeur individuel, qui constitue le moyen d'évacuation du S.I.N.G.E. en cas d'immobilisation en hauteur. Enfin, ils devront posséder les autorisations réglementaires leur permettant d'effectuer les approches fluviales ou maritimes avec le ponton.

Aujourd'hui et... demain

- En 1997, une étude sommaire comprenant une première analyse de sécurité montrait la faisabilité de l'opération.

- En 1998, les études d'avant projet affinent le projet, et sont complétées par l'examen « CE de type » réalisé par un organisme notifié
- 1999 doit voir aboutir les études de détail, la réalisation du dossier d'appel d'offres et le début de la fabrication. L'année 2000 sera celle de la fabrication des pontons, de l'achèvement de l'outil, des tests et de la première campagne.



Devant les enjeux sociaux et financiers importants que représente les grands ouvrages, la préoccupation des gestionnaires de parc d'ouvrages d'art s'oriente manifestement vers les techniques d'entretien préventif. Dans le but de pouvoir réaliser commodément les actes de maintenance indispensables aux parties d'ouvrages sensibles que sont les piles de grande hauteur, le S.I.N.G.E., développé à partir d'une idée originale, devrait connaître un avenir prometteur.

Ses possibilités sont telles qu'il devrait intéresser plus d'un maître d'ouvrage.

G. DELFOSSE – J.-M. TESSIER ■

Gérard DELFOSSE

IDTPE - DML
SETRA - CTOA
Tel : 01 46 11 35 98

Jean Marc TESSIER

Directeur du bureau d'études
DEP - Grenoble
Tel : 04 76 62 84 54



Château de Blois

Description des travaux

Les services techniques de la ville de Blois, en collaboration avec l'architecte des monuments historiques, ont engagé la réhabilitation de plusieurs salles du château, dont l'aile François 1er.

Les planchers de celle-ci sont à ossature bois, et l'ensemble du remplissage sera déposé pour ne conserver que la poutraison qui sera recouverte par une dalle mince de béton, associée aux poutres par le biais de connecteurs. Toutefois, avant d'engager ces travaux, une étude de faisabilité a porté sur les poutres principales qui ont été renforcées en 1894 par des poutres rivetées, en fer puddlé. Dans un premier temps, la solution retenue était de déposer ces poutres de renfort dont la résistance mécanique n'était pas connue, et de les remplacer par une structure neuve. Cependant, devant l'ampleur des travaux que cette solution impliquait, et vu le contexte "délicat" du chantier (site classé), les services techniques de la ville de Blois ont fait appel au réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées pour déterminer la nature des matériaux constitutifs des poutres de renfort.

Choix de la méthode d'investigations

Dans une première étude, trois échantillons de métal ont été prélevés sur les poutres de renfort. Les résultats des essais de traction et des analyses métallographiques ont montré que le fer puddlé utilisé pour ces poutres avait une bonne limite élastique, à savoir 300MPa. Aussi, c'est vers une conservation de ces poutres que s'est orientée la maîtrise d'ouvrage, **sous réserve toutefois d'une confirmation de la nature du matériau constitutif de toutes les poutres.**

Techniques particulières

L'analyse par spectromètre optique par étincelage portable : un essai non destructif intéressant.

Suite à cette première étude, une deuxième investigation a donc été mise en place afin de vérifier l'homogénéité des caractéristiques mécaniques des douze poutres de renfort. Des prélèvements ne pouvant pas être envisagés sur toutes les poutres, d'une part, car celles-ci sont classées et qu'il s'agit d'une méthode destructive, d'autre part, car les semelles supérieures sont difficilement accessibles, le LRPC de Nancy a proposé une méthodologie différente. La méthode retenue consistait à effectuer, sur l'ensemble des poutres, des analyses chimiques grâce à un spectromètre optique par étincelage portable. Puis après interprétation sur place des résultats, trois échantillons ont été prélevés sur les semelles inférieures des poutres au niveau des appuis pour réaliser des essais de traction en laboratoire.

Investigations sur site

L'appareillage utilisé est un spectromètre optique par étincelage sous argon SPECTRO PORT. L'analyse du carbone, soufre et phosphore est réalisée au moyen d'une optique spéciale disposée à proximité de la source d'excitation. Les surfaces analysées sont préalablement meulées pour élimination de la peinture et de la couche d'oxydes.

À noter que l'étalonnage de l'appareil a été réalisé sur un des échantillons prélevés lors de la première étude et dont l'analyse chimique avait été déterminée en laboratoire.

Sur la totalité des poutres, nous avons procédé aux analyses chimiques des âmes, des semelles supérieures et des semelles inférieures des poutres des niveaux 1 et 2 côté cour et refend (ce qui représente 60 analyses en une journée). Les analyses ont parfois été perturbées par la présence d'inclusions non métalliques en proportion variable, et par les défauts de planéité des sur-



faces ne permettant pas d'assurer l'absence de contamination de la chambre d'analyse par l'oxygène environnant (le cas échéant, les mesures étaient reproduites sur une zone voisine). Ces investigations ont été complétées par des mesures de dureté Vickers sur la totalité des poutres, dans les mêmes zones que celles concernées par les analyses chimiques.

Résultats des essais :

Les compositions chimiques des différentes poutres présentent peu de disparités, et les teneurs en différents éléments principaux sont les suivantes :

- carbone : valeur moyenne de 0.01 %
- manganèse : valeur moyenne de 0.13 %
- silicium : valeur moyenne de 0.29 %
- soufre : valeur moyenne de 0.04 %
- phosphore : valeur moyenne de 1.04 %

Ces valeurs se situent dans les fourchettes caractéristiques du fer puddlé, avec cependant une teneur en phosphore un peu au-dessus de la moyenne : ceci est dû au fait que l'on sort ici des gammes d'étalonnage courant, mais cela ne remet nullement en cause l'analyse effectuée (à noter que l'analyse de chaque élément est indépendante, aussi cette variation sur le phosphore n'altère pas les autres teneurs).

Les limites élastiques obtenues sont de l'ordre de 250 N/mm^2 , et les limites à la rupture de l'ordre de 375 N/mm^2 ($R/Re \approx 1,5$). Les valeurs obtenues

sont très voisines pour les trois échantillons, et se rapprochent des résultats correspondant à un échantillon de la première étude.



D'autre part, ces valeurs sont à rapprocher des valeurs moyennes données dans divers articles.

Conclusion : bilan de l'expertise

Les différentes investigations menées, à savoir les analyses chimiques, les essais de dureté et les essais de traction ont donné les résultats suivants :

- des compositions chimiques homogènes sur les 12 poutres
- des duretés présentant peu de dispersion sur les 12 poutres
- des résistances mécaniques bonnes et très voisines pour les 3 échantillons.

Ceci a permis d'assurer que la nature du matériau employé pour l'ensemble des poutres métalliques de renfort des salles du 1er et 2e étage de l'aile François 1er du château de Blois était du fer puddlé homogène, et que la limite élastique de 250 N/mm^2 pouvait être retenue pour les calculs de résistance des structures. Cette investigation complémentaire a donc évité la destruction d'un patrimoine classé, et permis d'importantes économies (en études et travaux) pour la maîtrise d'ouvrage, à partir d'une méthode basée essentiellement sur des essais non destructifs.

L'utilisation du spectromètre optique portable a donc donné entière satisfaction pour cette étude, et son utilisation peut être envisagée pour de nombreuses analyses auxquelles sont confrontées régulièrement les CDOA ou services travaux des DDE. Il permet d'obtenir rapidement et simplement des analyses chimiques d'acier, et en ce sens, il vient compléter la liste des essais non destructifs actuellement réalisés par le réseau technique de l'équipement, moyennant quelques précautions d'étalonnage.

M. DELANNOY ■

Vue du spectromètre de chantier

Vue d'ensemble de l'appareil

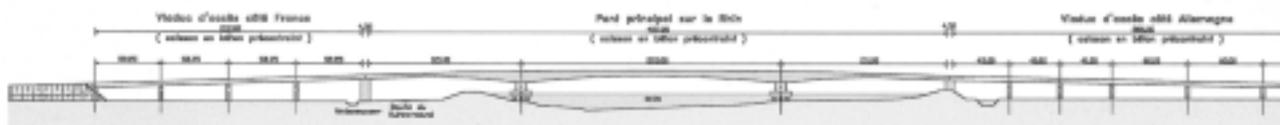
Marc DELANNOY
ITPE – Unité Construction
métallique
Laboratoire Régional de
Nancy
Tel : 03 83 18 41 41

Pont sur le Rhin entre Eschau et Altenheim

Les études hydrauliques sur modèle réduit physique des appuis dans le fleuve

Le nouveau pont sur le Rhin entre Altenheim (RFA) et Eschau (France), au sud de Strasbourg, délestera le pont de l'Europe et assurera une nouvelle liaison entre l'Alsace et le Bade-Wur-

temberg en dehors des zones urbanisées. Il permettra aussi de relier les deux axes autoroutiers principaux du couloir rhénan que constituent l'A 5 côté Allemagne et l'A 35 côté France.



Élevation générale du pont

Ce nouveau franchissement du Rhin comporte un pont principal long de 457 m sur le fleuve, financé à parts égales par les deux États et construit sous maîtrise d'œuvre française en application du traité du 5 juin 1996 et deux viaducs longs de 215 m (côté France) et 280 m (côté Allemagne) financés et construits par chaque pays.

se sont avérées nécessaires pour valider et optimiser les solutions envisagées.

1- Description des appuis dans le fleuve

Le pont principal franchit le Rhin avec un biais de 65 degrés. Le tablier, constitué d'une poutre caisson de 14,75 m de largeur, pouvant être soit entièrement métallique, soit entièrement en béton précontraint, comporte trois travées de 121 m, 205 m et 131 m⁽¹⁾.

Les deux piles principales sont situées dans le fleuve; leur conception tient compte du séisme alsacien potentiel ($a_0 = 2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), des chocs accidentels de bateaux (convois poussés constitués de 2 fois 3 barges pouvant atteindre 22 m de largeur, 185 m de longueur et un poids total de 12000 t) et doit permettre de réduire les impacts hydrauliques (lignes d'eau, affouillements du lit et des berges) au strict minimum.

Compte tenu de la nature du sol de fondation et des descentes de charges élevées - supérieures à 15000 tonnes pour la solution tablier béton - seules des fondations profondes sur pieux de fort diamètre ont été envisagées.

Les caissons havés ont été écartés compte tenu des difficultés prévisibles pour les descendre suffisamment profond dans les graves compactes. De plus, peu d'entreprises disposent de savoir-faire dans cette technique particulière abandonnée depuis de nombreuses années en France. Les semelles édifiées au fond du lit et reposant sur des pieux ont également été écartées en

Vue d'ensemble du franchissement (maquette DDE du Bas Rhin)



La conception et la mise au point du projet des appuis et fondations du pont principal et de leur protection contre les affouillements furent longues et délicates compte tenu d'un contexte hydraulique particulièrement contraignant. Des études hydrauliques sur modèle réduit physique

1. La description complète de l'ouvrage dont l'appel d'offres est actuellement en cours (mai 1999) fera l'objet d'un article dans un prochain numéro d'Ouvrages d'Art.

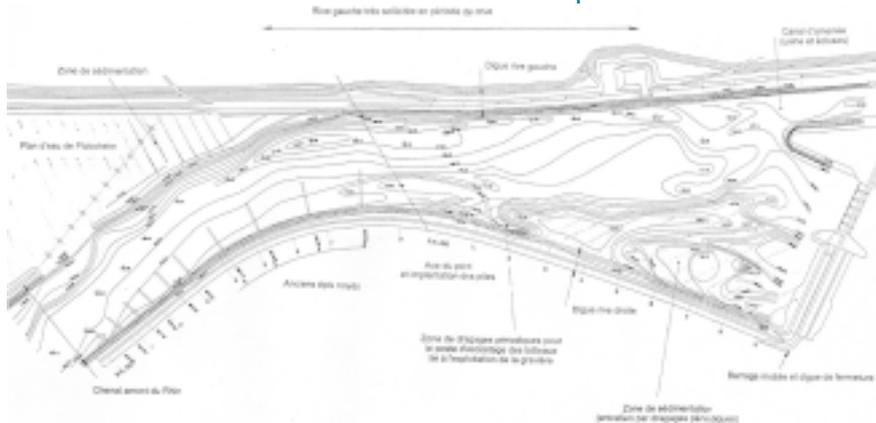
raison des difficultés prévisibles d'assèchement des batardeaux de grande profondeur (supérieure à 10 m) qu'il eût été nécessaire de réaliser eu égard à la perméabilité élevée des graves rhénanes.

Aussi a-t-il été prévu de réaliser des semelles « perchées » situées au voisinage de la ligne d'eau. Ces semelles en forme de losange d'environ 26 m par 14 m coiffent 10 pieux (solution métallique) ou 11 pieux (solution béton) Ø 1800 mm. Ces pieux sont forés à l'abri de chemises métalliques perdues descendant jusqu'à la côte d'affouillement prévisible.

Cette conception, qui s'inspire des ouvrages en site maritime, présente plusieurs avantages :

- elle permet de réduire le maître couple et de minimiser ainsi l'impact hydraulique des appuis ;
- les semelles peuvent être réalisées soit à l'abri de batardeaux partiellement remblayés soit à

Morphologie du fleuve au droit du franchissement. Levé bathymétrique de 1994.



partir de caissons partiellement ou totalement préfabriqués, suivant les méthodes d'exécution proposées par les entrepreneurs.

2 - Contexte fluvial et hydraulique

2.1 - Les aménagements successifs du Rhin

Le Rhin, fleuve jadis à l'état sauvage, au lit parsemé d'îles souvent étendues et séparées de faux bras, a été fortement remanié par l'homme à partir du milieu du XIX^e siècle le long de la frontière franco-allemande. Tout d'abord, les travaux de « correction » consistèrent à rassembler les eaux moyennes dans un lit unique de 300 m de largeur environ. Ces travaux, en supprimant de nombreux méandres et boucles, eurent pour conséquence dommageable l'augmentation très notable de la vitesse de l'eau et l'accélération de l'érosion du lit rendant la navigation très difficile. Au début du XX^e siècle, suivirent les travaux de « régulation ». Ces travaux consistèrent à allonger artificiellement le chenal à l'intérieur même du lit mineur en créant des sinusoides par

Vue des appuis dans le fleuve :
 • avec tablier béton
 • tablier retiré
 (Maquettes DDE du Bas Rhin)

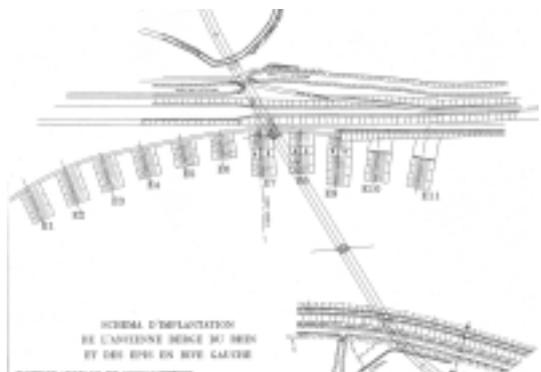
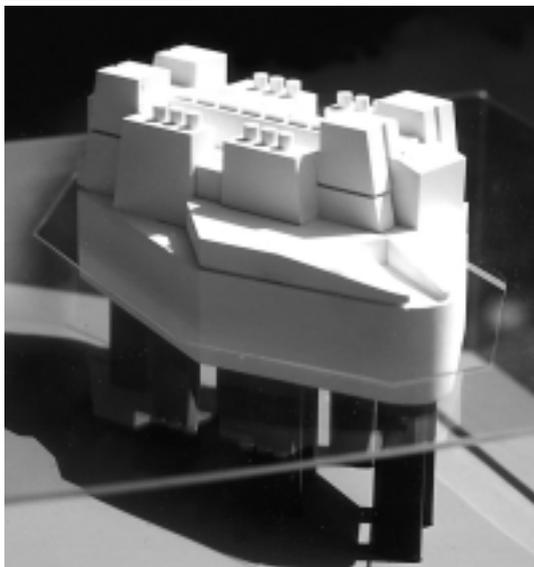
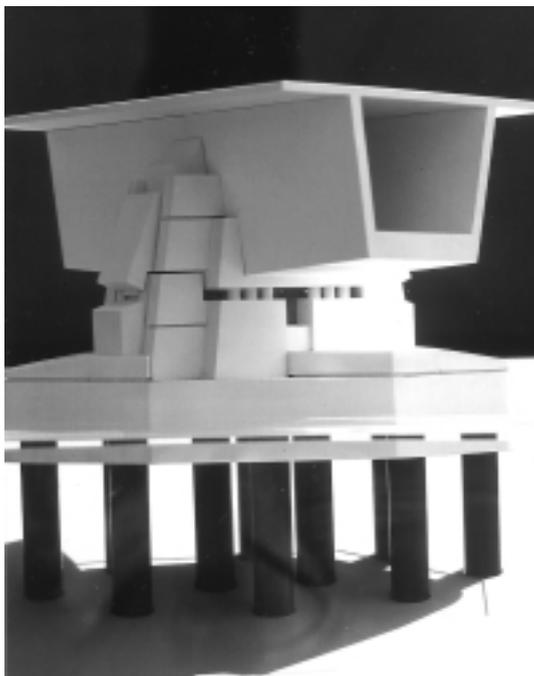


Schéma d'implantation de l'ancienne berge du Rhin et des épis

la mise en place de digues transversales appelées "épîs".

Enfin, survint l'aménagement hydroélectrique du fleuve réalisé entre 1932 et 1977, avec pour conséquence la canalisation du Rhin, qui se caractérise par la réalisation de huit biefs successifs de Kembs à Iffezheim.

■ 2.2 - Caractéristiques du fleuve au droit du franchissement

Lors de l'aménagement du bief de Strasbourg, effectué en 1970, le niveau des plus hautes eaux navigables a été exhaussé d'environ six mètres au-dessus de la plaine d'Alsace au droit du franchissement projeté.

Le fleuve est endigué par des ouvrages latéraux dimensionnés pour des crues millénales ($6500 \text{ m}^3/\text{s}$) et réalisés avec des matériaux récupérés sur le site.

Le site du franchissement se caractérise par une courbe prononcée du fleuve et un profil en travers dissymétrique avec une nette tendance à l'alluvionnement à l'intérieur de la courbe. Immédiatement en aval et en rive gauche (côté France), débute le grand canal d'Alsace, dérivation desservant l'usine hydroélectrique et l'écluse de Strasbourg. En rive droite (côté Allemagne), le barrage de Strasbourg régule le débit réservé au "Vieux Rhin" pouvant également fonctionner comme évacuateur de crues en hautes eaux.

En amont, le bassin de compensation de Plobsheim, vaste plan d'eau de 600 hectares, permet le fonctionnement "en écluse" des usines hydroélectriques de Strasbourg pour répondre aux fortes demandes en énergie aux horaires de pointe.

Depuis la canalisation du fleuve, la ligne d'eau ne varie que très faiblement (une vingtaine de centimètres tout au plus) quels que soient les débits au droit du franchissement. En revanche les vitesses varient sensiblement de manière proportionnelle aux débits (de $0,65 \text{ m/s}$ à $2,70 \text{ m/s}$ lorsque le débit varie de 1500 à $6500 \text{ m}^3/\text{s}$).

Le fleuve canalisé, accessible aux bateaux de gros tonnages (convois poussés constitués de 6 barges d'une longueur totale proche de 180 m) en toutes circonstances, est le siège d'un important trafic commercial (environ 23 millions de tonnes de fret annuel en amont de Strasbourg). Compte tenu des difficultés de manœuvre des bateaux liées à la courbure du fleuve d'une part, aux courants « traversiers » lorsque les vannes du

barrage sur le vieux Rhin sont ouvertes (en hautes eaux) d'autre part, la portée de la travée centrale au-dessus du chenal navigable a été fixée à 205 m par les services de la navigation français et allemand.

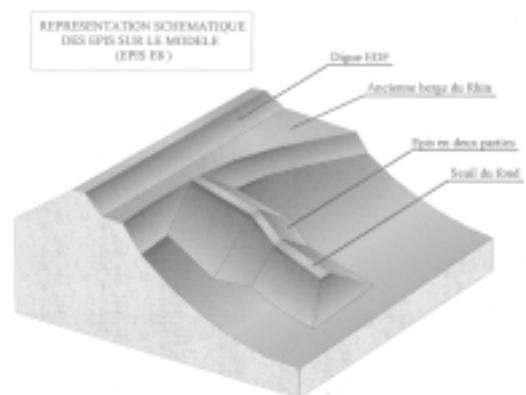
Par ailleurs, les piles situées dans le lit du fleuve doivent pouvoir supporter les chocs accidentels de bateaux de 12000 tonnes évoluant à 20 km/h soit un effort statique horizontal forfaitaire évalué à 5000 tonnes (valeur de référence) appliqué au niveau des plus hautes eaux navigables.

■ 2.3 - Considérations géotechniques

Les sondages carottés réalisés à la verticale des appuis ont reconnu des graves plus ou moins sableuses sur plus de 40 m d'épaisseur. Excepté la tranche affouillable située immédiatement sous le lit du fleuve, ces graves présentent d'excellentes caractéristiques pressiométriques ($p_l \geq 6 \text{ MPa}$) et des perméabilités généralement élevées.

3 - La nécessité des études sur modèle réduit physique

À l'issue des études hydrauliques conduites sur modèle mathématique par la société HYDRATEC, des incertitudes subsistaient sur la validité des valeurs d'affouillement à retenir pour les calculs des structures par application des formules hydrauliques usuelles compte tenu de la complexité du site fluvial au droit du franchissement projeté. Les conditions d'écoulement ont en effet été profondément modifiées par les aménagements hydrauliques successifs du fleuve.



La courbe prononcée du fleuve a fait l'objet par le passé de travaux de confortement et de protection par épîs et seuils de fond, compte tenu des problèmes d'érosion régressive rencontrés par les services de navigation. De l'avis même des

Schéma de l'épi E8 (perspective). La morphologie exacte des épîs a pu être reconstituée grâce aux plans d'archives et aux levés bathymétriques.

experts consultés, l'impact de ces aménagements successifs sur les écoulements est aujourd'hui difficile à cerner et les importantes fosses d'affouillement décelées à l'emplacement même de la pile P1 en rive gauche semblent indiquer que les fonds n'ont pas atteint leur profil d'équilibre dans ce secteur.

Il est également délicat d'appréhender la répartition des débits entre le vieux Rhin et le grand canal d'Alsace au droit de la diffluence située immédiatement en aval du projet d'une part, l'impact du bassin de compensation de Plobsheim en amont et de la gestion hydroélectrique du bief d'autre part.

Enfin, compte tenu de la surélévation du fleuve d'environ 6,00 m au-dessus de la plaine d'Alsace, le moindre incident sur les digues lors de la réalisation des appuis et fondations du pont serait de nature à compromettre la protection et donc la sécurité des populations riveraines.

Aussi, des études sur modèle réduit physique ont-elles été décidées avec pour objectifs principaux de tester la bonne tenue de la pile située à l'extérieur de la courbe, rive gauche et de ses fondations sous les différentes conditions d'écoulement du fleuve, de vérifier les impacts de cet appui sur la digue proprement dite et de dimensionner les protections à mettre en œuvre.

4 - Procédure de dévolution retenue et attribution du contrat d'assistance technique à la maîtrise d'œuvre pour la réalisation des études sur modèle réduit

Compte tenu du très faible nombre de sociétés d'ingénierie spécialisées dans le domaine concerné, il a été décidé de passer, après avis d'appel public à la concurrence, deux marchés de définition simultanés à titulaires multiples et ayant même objet, afin d'aborder la problématique des études hydrauliques en laboratoire.

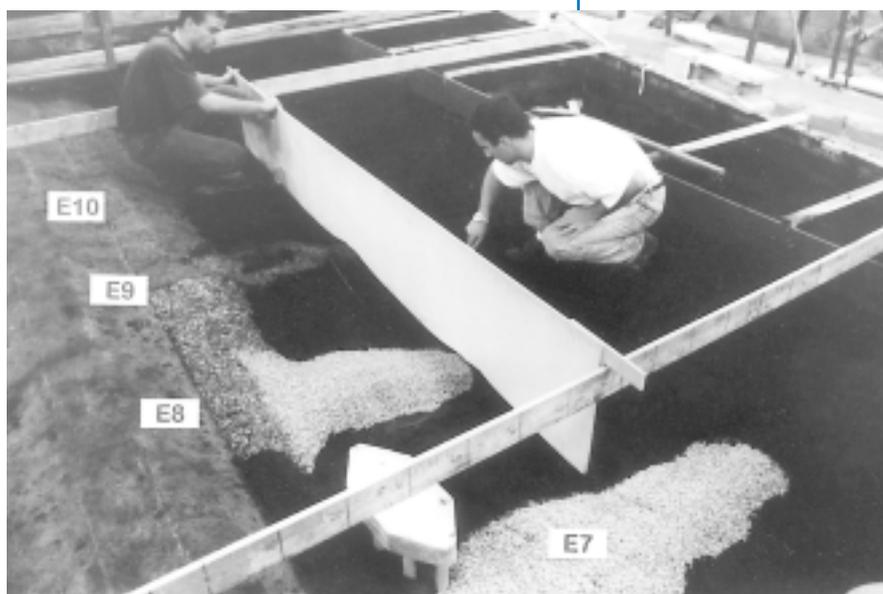
Cette procédure s'appuie sur les articles 104.10, 106 et 108 (relatifs aux marchés de définition) et 104 II 3 (relatifs aux marchés négociés) du code des marchés publics.

Les sociétés, sélectionnées d'après leurs références, ont été invitées, sur la base des études théoriques déjà réalisées par la société HYDRATEC, à définir le programme et la méthodologie à appliquer pour mettre en œuvre les

études hydrauliques sur modèle réduit physique nécessaires en vue de consolider les résultats des études antérieures vis-à-vis des affouillements au voisinage de l'appui rive gauche, tant en phase de construction qu'en phase de service de l'ouvrage.

Les études de définition ont été jugées par un comité technique constitué de représentants de la maîtrise d'ouvrage, de la maîtrise d'œuvre et d'experts extérieurs (*SETRA, Services de la Navigation, EDF gestionnaire des digues...*).

La société ayant présenté la proposition la plus pertinente (*Compagnie Nationale du Rhône - CNR*) s'est vue confier la réalisation des études sur modèle réduit.



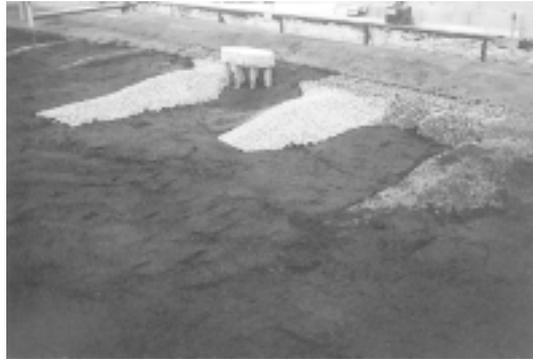
5 - Construction et calage du modèle, principaux enseignements et résultats obtenus

■ Construction du modèle

Sur un modèle réduit physique à fonds mobiles - y compris les épis en enrochements - réalisé à l'échelle 1/60^e dans les Laboratoires de la Compagnie Nationale du Rhône à Lyon - Gerland, la superposition des aménagements d'EDF, de l'ancienne berge du Rhin et des épis, ont été fidèlement représentés sur une longueur d'environ un kilomètre. La construction du modèle a été établie à partir des nombreux relevés bathymétriques corrélées avec les plans de récolement des digues disponibles dans les archives d'EDF et des services de navigation.

Vue du modèle réduit en cours de construction.

Vue du modèle réduit. Les épis encadrant la pile ont été rendus mobiles (la peinture verte sur les enrochements permet de s'assurer de leur stabilité au cours des tests).



Compte tenu de la nature des matériaux réels et des phénomènes à étudier - affouillements et engravements locaux autour d'une structure - les fonds du modèle ont été représentés en charbon, permettant d'être en similitude de transport par charriage.

Vue de l'ensemble du modèle réduit asséché : on distingue en rive gauche les épis de protection de la berge.



■ Programme d'essais

Les différentes conditions d'écoulement caractéristiques retenues pour le projet (débit moyen du Rhin, débits décennal, centennal, millénal) ont été simulées à l'état initial (sans les piles), en phase de construction des appuis et fondations, en phase « ouvrages achevés », avec et sans protections.

■ Principaux enseignements et résultats obtenus

▲ Calage du modèle et état initial

Afin de reproduire le plus fidèlement possible les conditions d'écoulement réelles, le calage du modèle a été réalisé à partir des mesures de champs de vitesses relevées in situ à l'étiage (juin 1997) et en crue (août 1997), une partie du débit transitant dans ce dernier cas par le vieux Rhin en rive droite. Les simulations correspondantes ont permis de reconstituer l'évolution générale des fonds et la morphologie du lit du fleuve telles que nous les connaissons actuellement et de mettre notamment en évidence que les fosses d'affouillement repérées en rive gauche se sont formées avant la canalisation du bief de Strasbourg, lorsque les vitesses d'écoulement étaient plus élevées (la section hydraulique était alors beaucoup plus faible).

Ces données corroborent les informations tirées des levés bathymétriques quinquennaux du Rhin réalisés depuis plus de 30 ans, des archives d'Électricité de France et des investigations géotechniques.

Ces simulations ont par ailleurs mis en évidence que les vitesses à l'extérieur de la courbe étaient notablement plus faibles que celles normalement attendues, compte tenu de l'effet de macro-rugosité créé par les épis du Rhin régnant tout le long de la berge.

L'analyse de l'évolution des fonds a par ailleurs montré que les fosses ont tendance à se combler lors des fortes crues. Le système d'épis étant aujourd'hui complètement noyé, son fonctionnement diffère fondamentalement du principe d'origine pour lequel il était conçu; en rejetant l'écoulement vers le centre du fleuve, l'essentiel du transport solide par charriage se fait en dehors de la zone des épis et donc de la zone de l'appui. L'ancienne berge du Rhin et donc a fortiori la digue d'EDF ne subissent aucun dommage. La crue millénale n'a pas plus d'impact que la crue décennale.

▲ En phase de construction

Les simulations ont été réalisées en considérant respectivement un batardeau entourant la pile et un batardeau se refermant sur la berge rive gauche, en retenant le débit de la crue centennale, au vu de l'impossibilité de pouvoir garantir que la période de travaux se situera en période d'étiage.



L'analyse d'impact de ces deux solutions constructives sans protection des fonds a montré qu'il n'est pas indispensable de réaliser la protection en même temps que le batardeau, si le débit n'excède pas le débit de la crue décennale. Toutefois, les affouillements en pied de palplanches, en rive droite, atteignant près de 4,00 m, il est préférable de protéger le pied du batardeau au fur et à mesure du battage des palplanches de l'amont vers l'aval. Le batardeau se refermant sur la digue n'est pas plus pénalisant que l'autre solution en termes d'affouillement général ; par contre, en produisant un courant de retour important à l'amont, il nécessite une protection immédiate du pied de la digue EDF.

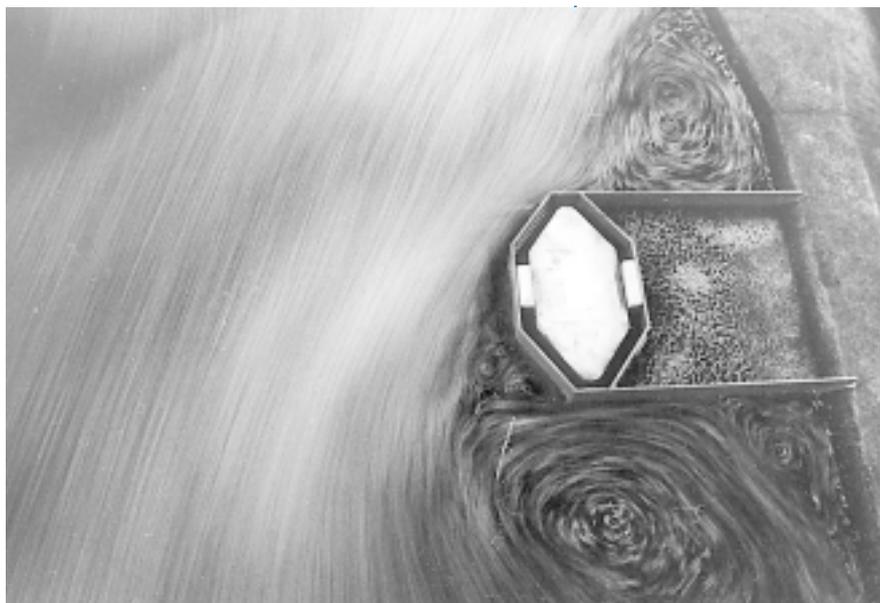
▲ En phase définitive (ouvrages achevés)

Les tests conduits sans protection ont mis en évidence que les pieux et semelles engendrent localement des turbulences augmentant avec le débit. L'observation des fonds montre l'apparition d'affouillements autour des pieux à partir du débit de la crue décennale. Pour des débits plus importants, une fosse d'affouillement généralisée se développe en aval rive droite de la pile, 3 m plus bas que le fond de la fosse actuelle. Par érosion régressive vers la berge, le pied de digue EDF se trouve décaissé sur une hauteur d'environ 1,50 m.

Les tests ont par ailleurs mis en évidence que la suppression éventuelle des épis existants en amont de l'ouvrage (par défaut d'entretien par exemple) ne compromettrait pas la bonne tenue de l'appui, ni celle de la digue rive gauche.

■ Choix et optimisation des protections

Le dimensionnement puis l'optimisation d'une protection en enrochements a conduit à recouvrir les fonds d'une couche de protection en enrochements de 10 - 100 kg de 1,00 m d'épaisseur, s'étendant de la zone inter-épis où se situe



l'appui jusqu'à zone inter-épis aval, son avancée vers l'intérieur du fleuve atteignant 80 m. Les tests ont montré que cette protection est parfaitement stable pour le débit projet de 6500 m³/s.

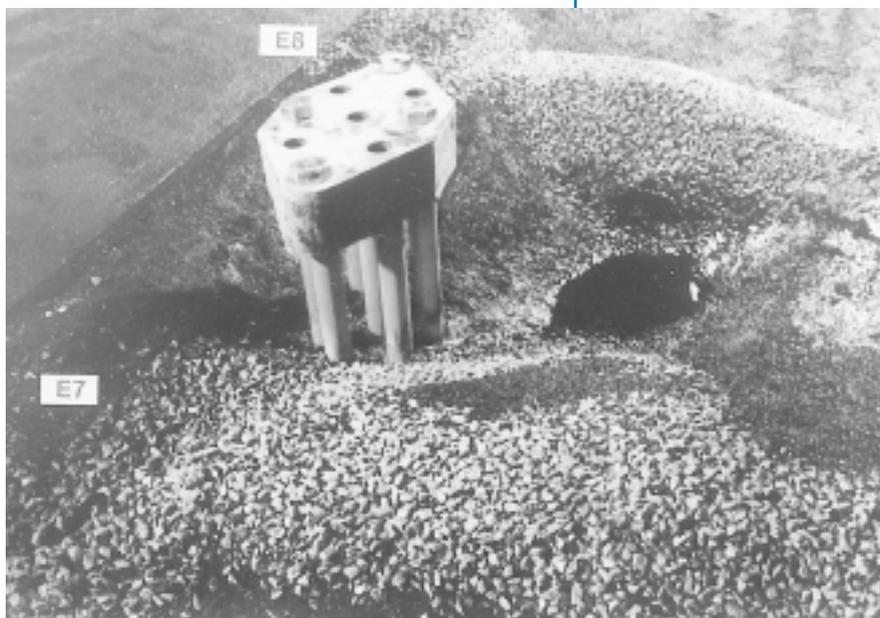
6 - Conclusion

L'étude sur modèle réduit de l'impact de l'appui rive gauche du futur franchissement du Rhin entre Altenheim et Eschau a donné les résultats essentiels suivants :

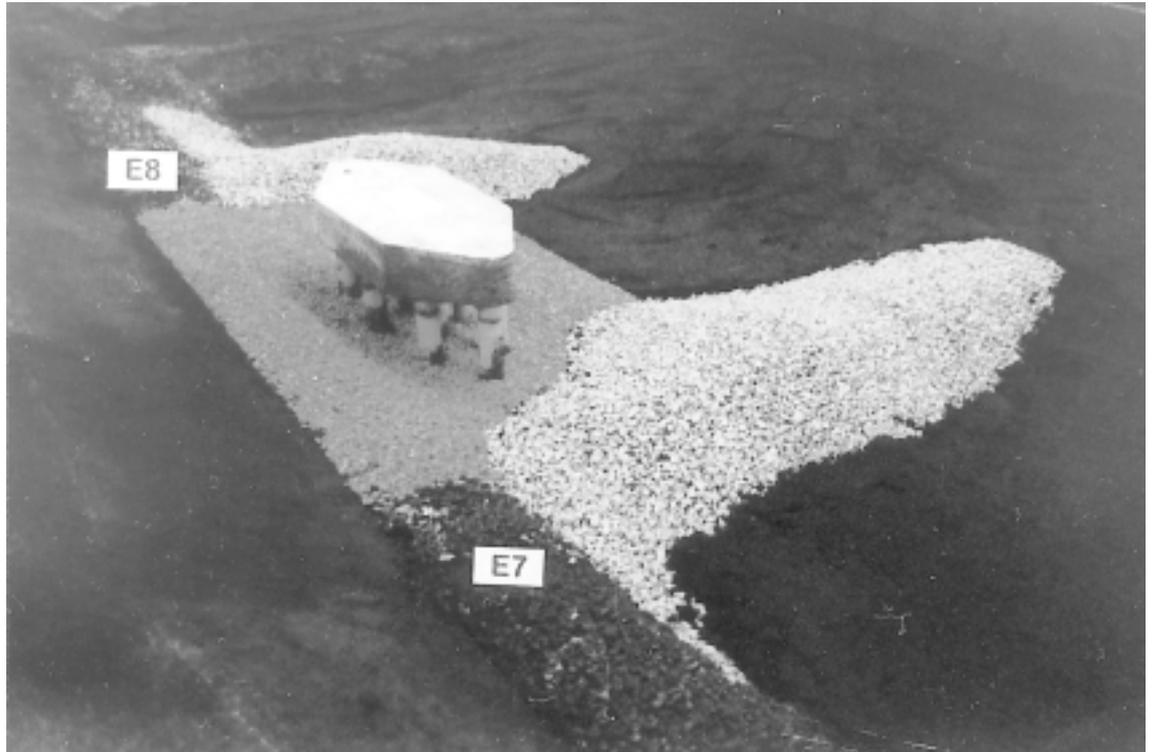
Dans l'état actuel, le Rhin, géré suivant la consigne de niveau du barrage de Strasbourg et protégé par le système d'anciens épis, ne présente aucun risque d'affouillement en rive gauche au droit du projet de franchissement, et ce y compris jusqu'au débit de la crue millénaire.

Modèle réduit.

- À gauche : chronophotographie faisant apparaître les turbulences dans le sillage de la pile (essai sans protection - Q 10)
- En haut : chronophotographie faisant apparaître les turbulences et décolllements des lignes de courant dans le sillage de l'appui (essai avec batardeau - Q 100)
- Ci-dessous : Vue de l'état des fonds au voisinage de la pile P1 après simulation de la crue centennale (essais sans protection).



Modèle réduit. Mise en place des protections en enrochements (en gris foncé) entre les épis existants (en gris clair).



Sans protection complémentaire, l'appui et ses fondations engendrent des affouillements inacceptables vis-à-vis des critères de stabilité de la digue EDF, à la fois pour ce qui concerne le pied de digue (risque de sous-cavage) et la digue elle-même (glissement).

La protection en phase définitive peut être constituée d'encochements de 10 - 100 kg sur une épaisseur de 0,80 m. Elle est stable pour tous les débits, y compris le débit de la crue millénaire.

Cette protection est suffisante en phase de travaux pour le débit de la crue centennale et pour les deux types de batardeaux envisagés.

Des précautions supplémentaires ont été adoptées par la maîtrise d'œuvre lors de la mise au point finale du projet.

Un rideau de palplanches de 14 m de fiche a été prévu en pied du talus mouillé de la digue. Cette paroi régissant sur environ 80 m permet de se prémunir contre les risques de glissement du pied du talus lors des travaux de démolition partielle des épis en enrochements, préalablement au forage des pieux d'une part, contre les risques de « passage d'eau » sous la digue liés au décol-

matage du fond du lit lors des travaux de dragage du lit du fleuve d'autre part.

Compte tenu des difficultés liées à la mise en œuvre des enrochements sous des hauteurs d'eau importantes, la blocométrie des enrochements a été portée à 35 - 200 kg, l'épaisseur de la couche à 1,30 m et la surface des fonds protégés a été élargie afin de reconstituer en totalité les épis existants.

G. TREFFOT ■

● Maître d'ouvrage

Etat Français

● Maître d'œuvre

Direction Départementale de l'Équipement du Bas-Rhin - Service des Grands Travaux

Assisté de :

● Études des structures :

Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (Tablier)
Jean Muller International (appuis et fondations)

● Études hydrauliques :

Hydratec
Compagnie Nationale du Rhône

● Études Géotechniques :

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg
Hydrogéo

● Études architecturales :

P. Fraleu

Guy TREFFOT

ITPE - Unité Pont sur le Rhin
DDE du Bas Rhin
Tel : 03 88 75 83 25

L'asphalte coulé pour revêtement de ponts à tablier métallique

Exemple du pont suspendu du Storebaelt au Danemark



Vue aérienne, ouvrage dit Est

L'article qui suit présente une solution originale pour le revêtement du pont suspendu du Storebælt au Danemark. Il s'agit d'un tablier entièrement métallique et les revêtements sur support métallique ont des particularités qui nécessitent des solutions particulières, ce qui explique que la solution utilisée sur cette partie d'ouvrage suspendu soit différente des revêtements sur les autres tabliers de la même liaison qui sont à support en béton de ciment (la technique à base de feuille bitumineuse préfabriquée sous revêtement bitumineux est très semblable à ce que nous avons en France).

L'originalité vient dans l'utilisation de l'asphalte dans ce type de revêtement. En effet, ce matériau n'est absolument pas utilisé sur ce type d'ouvrages en France et il a paru intéressant de confronter cette solution à nos techniques.

Il faut savoir qu'un revêtement sur un support métallique doit assurer simultanément deux fonctions : la protection anticorrosion de la tôle de platelage et le support du trafic. En outre, les tôles utilisées pour le support ont des épaisseurs comprises entre 10 (pour les Viaducs Métalliques Démontables ou VMD) et 12 à 14 mm (selon le trafic Poids Lourds). Cette épaisseur a pour but un allègement maximum de la structure. Ces tôles sont raidies par des renforts disposés régulièrement en sous-face du platelage.

Au droit de ces raidisseurs, le passage des roues crée une flexion de la tôle et le revêtement doit suivre ce mouvement sans se détériorer. A chaque passage de roue, le système est donc sollicité et il peut y avoir des ruptures par fatigue tant dans la tôle de platelage (ce que l'on constate parfois sur les VMD à tôles trop minces) que dans le revêtement.

En France, nous disposons d'un dispositif d'essai appelé "appareil de flexion sous moment

négalif pour la mesure de la résistance à la fatigue des revêtements de chaussée sur support métallique - Essai de tenue à la déformation du support au droit d'un raidisseur". Dans le cadre de la procédure d'Avis Technique sur les procédés destinés à ce type de support, tous les revêtements doivent subir cet essai qui est très discriminant mais aussi très représentatif de ce qui se passe sur un pont sous trafic.

Actuellement les produits concernés appartiennent aux familles suivantes, sans que cette liste soit exhaustive:

- Produits coulés en place, à base de résine de synthèse,
- Produits préformés,
- Revêtements épais (dont l'épaisseur doit être supérieure ou égale à 6 cm).

Le marché concerné est très faible puisque l'on traite, en revêtement neuf ou en réfection, un à deux ouvrages entièrement métalliques par an, ce qui explique que peu d'entreprises ont fait l'effort d'une recherche dans ce domaine et, dans les systèmes épais, seuls deux procédés à base de liant bitumineux modifié par des polymères sont actuellement en cours de demandes d'avis technique et trois procédés dans le domaine des produits coulés en place minces.

Par contre, les ouvrages concernés sont souvent majeurs comme liaisons routières : ponts de Normandie, de Cheviré, de Saint Nazaire, Mathilde, de Caronte, etc.

D'où l'intérêt de choisir des techniques performantes et durables. Nous suivons avec intérêt le comportement de la solution décrite dans l'article ci-après et nous souhaitons longue vie à ce complexe.

M. FRAGNET ■

FRAGNET Michel
Ingénieur
Cellule Equipements
S.E.T.R.A. - CTOA
Tel : 01 46 11 32 13

Introduction

■ Vue d'ensemble

Le pont sur le bras de mer du Grand Belt au Danemark est de loin le second en importance au Monde et le plus grand d'Europe. La réalisation de ce projet géant a concrétisé un rêve de toujours des Danois : relier Copenhague — la capitale — bâtie sur l'île de Seeland, au continent. Le 14 juin 1998, le Pont du Storebaelt, le plus prestigieux ouvrage de génie civil d'Europe après le Tunnel sous la Manche, fut livré à la circulation par S.M. la Reine du Danemark.

L'ouvrage du Storebaelt, d'un coût global de 30 milliards de francs comprend :

- un tunnel sous-marin, reliant Korsoer à Allburg
- le pont côté Ouest, en béton reliant Knudshoved à l'île de Sprogø
- l'ouvrage côté Est, reliant Sprogø à Korsoer par un pont suspendu entièrement métallique dont le revêtement fait l'objet du présent article.

■ Le Pont "Est"

Les éléments métalliques préfabriqués de 21 m de long et 30 m de large du tablier, ont été réalisés en Italie, transportés par voie maritime au Portugal pour assemblage en éléments de 4 x 21 m avec revêtement antirouille, et acheminés également par mer au Danemark, où ils ont été

hissés directement des barges, pour amarrage aux suspentes.

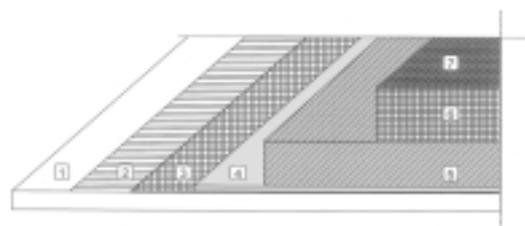
Le revêtement du pont suspendu

■ Le Complexe

▲ Exigences initiales :

- chaque couche doit être étanche,
- adhérence totale entre chaque couche et au support,
- limitation du poids mort au m² avec une épaisseur du complexe ≤ 59 mm,
- durabilité du complexe étanchéité/roulement,
- possibilité de corriger les inégalités de niveau du support métallique.

■ Étanchéité



1. Tôle d'acier en l'état brut,
2. Tôle d'acier après grenailage aux billes d'acier,
3. Enduit primaire,
4. Mastic d'asphalte e = 4 mm,
5. Asphalte coulé de protection e = 25 mm,
6. Asphalte coulé pour couche de roulement e = 30 mm,
7. Gravillonnage de surface.

Pour permettre la réalisation d'une étanchéité répondant à des exigences qualitatives très sévères sous des conditions climatiques particulièrement rigoureuses, la mise en œuvre s'est effectuée sous protection bâchée, mobile, chauffée et climatisée.

Cette construction industrielle avait une largeur de 15 m (demi-largeur du pont) et une longueur de 120 m.

Au terme d'une station de 24 heures, l'abri bâché fut déplacé, après les opérations :

- de grenailage - sous pression - de la tôle d'acier,
- de l'application d'un enduit de formulation spéciale,
- d'un 2^e enduit servant d'accrochage à la couche de mastic d'asphalte d'étanchéité.

Schéma du complexe de revêtement

Aabri de protection mobile



■ Le complexe en asphalte coulé

Le maître d'ouvrage danois Storebaelt a fait procéder à une large consultation et à l'examen de divers complexes : bétons bitumineux, hot-rolled asphalt, complexe mixte enrobé/asphalte coulé et enfin un complexe tout asphalte (coulé).

Sur l'ouvrage en béton côté Ouest, l'étanchéité a été surmontée par des bétons bitumineux, tandis que sur la partie acier côté Est, **la décision fut prise en faveur du tout asphalte.**

Elle repose, à n'en pas douter, sur un large échange d'expériences et au vu de certaines références d'ouvrages similaires à l'étranger, à climats analogues.

Par contre, il y eut des divergences de vues sur la méthode de mise en œuvre du revêtement de circulation :

● Solution a

Réalisation préalable des bandes en rive, puis application de l'asphalte coulé par finisseur sur chenilles.

● Solution b

Mise en œuvre de l'asphalte au moyen d'un finisseur guidé sur rails.

Les autorités danoises ayant procédé à la visite de plusieurs ouvrages de référence, notamment en Suisse, la solution sur rails l'emporta.

Le maître d'œuvre exigea également la présence d'un cylindre presseur de gravillons guidé sur les mêmes rails, pour l'obtention d'un bon ancrage du gravillon de surfacage.

Sachant que les couches d'asphalte coulé pouvaient le cas échéant présenter des variations d'épaisseur par suite d'inégalités de planéité du support et qu'elles pouvaient devoir être mises en œuvre à des températures hivernales, le traitement superficiel assuré à l'arrière du finisseur méritait la plus grande attention.

Exécution des travaux

■ Le revêtement en asphalte coulé

Par souci d'optimisation du revêtement (à une épaisseur d'un poids le plus bas possible), il fut procédé, après l'application de la couche d'étanchéité en mastic d'asphalte, à un relevé de niveau à l'aide d'une poutre à capteur roulant sur les rails posés pour le finisseur, sur toute la zone comprise entre ces rails. Cette poutre, qui a été conçue et construite en Suisse, a permis de localiser avec précision les zones à épaisseurs minimales et maximales.

Les niveaux (épaisseurs) purent ainsi être corrigés à l'aide d'un programme informatique spécial, et les corrections (de niveau) en résultant purent



Poutre-support de cylindres pour incrustation, à pression variable, de gravillons de surfacage de revêtements de circulation en asphalte coulé.

ainsi être localisées avec précision dans la voie comprise entre les rails.

Par suite de conditions climatiques clémentes jusqu'à la mi-décembre 1997, il fut possible de maintenir la cadence journalière de 6 000 à 9 000 m² sur les ouvrages d'accès d'Halskov et une partie côté Sprogø, à ciel ouvert.

Par suite de retards sur la portée métallique et du souhait de resserrer les délais, le Maître de l'Ouvrage décida de poursuivre les travaux sous conditions particulières de protection (abri mobile) en période hivernale.

C'est ainsi que la mise en œuvre se poursuivit par temps glacial et par forts vents, sur une largeur de 16 m et à raison de 280 m/jour, sous protection.

En vue d'assurer une mise en œuvre sans failles, la capacité d'application fut doublée : le finisseur de largeur utile de 12,5 m, conçu par l'entrepreneur et fabriqué en Allemagne assura l'application sous abri, tandis qu'un deuxième finisseur, accouplé à une poutre à cylindres (pour l'incrustation du gravillon de surfacage), conçue par l'entreprise et fabriquée en Suisse, également sur rails, était prêt, en réserve, à entrer en action pour le cas où des conditions climatiques plus clémentes l'auraient permis, à ciel ouvert.

Finisseur asphalte coulé
(largeur utile 12,50 m)



■ Les formulations

Les compositions des asphaltes furent spécialement adaptées à l'ouvrage (tablier métallique et étanchéité par mastic d'asphalte). Il s'est agi de prendre en compte les variations dimensionnelles extrêmes - entre été et hiver - pouvant atteindre 280 cm et devant pouvoir être encaissées également par le revêtement.

Les épaisseurs retenues furent :

- 18 à 35 mm pour l'asphalte de protection et de reprofilage,
- 25 - 35 mm pour la couche de roulement.

À l'appui d'expériences faites sur des ouvrages similaires, on retint des formulations riches en filler et en bitume.

■ Production des matériaux

Une centrale fut érigée spécialement pour l'ouvrage, à Korsoer, dans le voisinage proche de la culée Est, où furent établies les installations des chantiers.

La solution retenue fut celle d'un tambour-cribleur-malaxeur, à 75-85 t/heure de capacité, tout spécialement adapté à la spécificité de l'ouvrage, et comportant de plus un post-malaxeur assurant un complément de qualité.

La fabrication du mastic d'asphalte s'est effectuée dans une installation séparée, qui elle aussi

était munie d'un post-malaxage. Rendement horaire : 15 t.

Toutes les fabrications ont fait l'objet de prélèvements, soumis à essais d'aptitude, d'une durée de 3 heures, au terme desquelles, et pour autant qu'elles répondaient rigoureusement aux exigences, étaient libérées pour leur transport au lieu d'application.

Sujets spécifiques liés à l'ouvrage

■ Les délais d'exécution

Le délai de 15 mois initialement imparti pour la mise en œuvre du complexe étanchéité/couche de roulement, en asphalte coulé, a dû être réduit à 9 mois par suite de retards accumulés pour l'édification de l'ouvrage porteur.

Le respect de ce délai raccourci nécessita une durée de travail de 7 jours sur sept, et parfois 24 heures d'affilée (parfois même en hiver).

■ Conditions climatiques

Par suite d'impératifs de plannings, il fallut que la mise en œuvre des couches de protection et de roulement puisse s'effectuer jusqu'à -2 °C et par vents de 16 m/sec.

Pour pouvoir assurer des prestations de qualité malgré ces conditions hors du commun, le recours à des méthodes et moyens matériels spéciaux s'avéra incontournable.

■ Oscillations du tablier

La configuration de l'ouvrage porteur présentait des inconvénients durant la construction.

Par vents forts, en particulier, l'ouvrage se mit à osciller. Cette oscillation du support, accrue par les vibrations provoquées par la circulation de chantier, fut parfois considérable. Elle entrava la qualité de la mise en œuvre et en particulier la planéité des couches du revêtement.

■ Entraves à la bonne marche du chantier

Le gros problème inhérent à ce gigantesque ouvrage à réaliser dans des délais si serrés, résida dans la présence de plus de 60 entreprises qui en tous lieux eurent à œuvrer sous la contrainte des délais, et devant emprunter le même accès, parfois à une seule voie (4 m). Et pour ajouter aux complications, et pour des impératifs de sécurité, il fallut limiter la circulation et les travaux simultanés pour ne pas provoquer des surcharges au



Centrale de malaxage pour production d'asphalte coulé (75 t/h)

droit des suspentes avec effet de report sur les câbles et les pylônes.

Il y eut parfois la présence simultanée de 52 engins de levage mobiles, et celle de 880 ouvriers, tous pressés par des délais impitoyables. Et c'est ainsi que les voies d'accès étaient bloquées pratiquement en permanence. Conséquence : les camions malaxeurs à asphalte ne purent - en phase finale notamment - n'opérer qu'une seule rotation par jour, ce qui entraîna journalièrement des temps d'immobilisation de 70 %.

Dès lors, il fallut doubler le nombre des camions malaxeurs de transport initialement prévu.

Contrôle de qualité

■ Généralités

Tout l'ouvrage étant réalisé selon les exigences ISO 9001, le recueil détaillé de mesures et résultats d'essais sur tous les matériaux et ouvrages finis fut incontournable.

Chaque livraison de matériaux (gravillons, sable, filler, bitume) fut contrôlée à grands frais et autorisée d'utilisation après résultats d'essais.

Lors de la mise en œuvre de l'asphalte coulé, chaque camion porteur fit l'objet de 9 prélèvements, dont 3 à titre conservatoire, les 6 autres étant soumis à essais selon les méthodes d'essais danoises (essai d'indentation à la bille, essai de poinçonnement).

Chaque troisième livraison fit l'objet d'une analyse complète.

De ce fait, et durant les périodes de mise en œuvre, il y eut la présence permanente d'un responsable de la qualité et d'un adjoint, chargés exclusivement des prélèvements, du contrôle des températures et de l'établissement des rapports de chantier.

C'est ainsi qu'en certains jours de pointes d'activité, il y eut jusqu'à 300 prélèvements, dont un tiers fut soumis à essais dans les plus brefs délais.

L'application d'une couche suivante ne fut autorisée qu'après :

- l'obtention des résultats de laboratoire de la couche sous-jacente,
- une inspection des lieux, selon modalités précises (contrôles effectués par 3, voire 4 personnes, durant une à plusieurs heures),
- la vérification des épaisseurs de la couche existante, au moyen d'un appareillage spécial (1 mesure par 12 m²),
- la juxtaposition de toutes les mesures et résultats d'essais et leur conformité aux exigences.

■ Contrôles internes

Les contrôles internes entraînèrent un coût de 140 F/tonne de matériau fabriqué, et concernèrent :

- la réception des matières premières,
- les essais rapides effectués sur toutes les charges des camions malaxeurs, avant le feu vert pour leur acheminement vers l'application,
- le prélèvement dans chaque malaxeur, pour le moulage de 3 plaques, dirigées sur le laboratoire.

■ Directives de chantier

Chaque opération, telle que :

- transport,
- application,
- prélèvements,
- gravillonnage de surface et son cylindrage,
- obturation des cavités de carotages
- etc.

devait faire l'objet d'une épreuve de convenance préalable.

Après agrément par les Maîtres d'œuvre et le Maître d'ouvrage, furent établies des "règles d'exécution" (working procédures).

Pour ce qui concerne à eux seuls l'étanchéité et les revêtements, il y eut ainsi 48 notes d'exécution!

■ Intérêt économique de l'ouvrage

Le Maître d'ouvrage du Pont du Storebaelt estima que le coût de cette réalisation géante serait amorti en l'an 2015, par autofinancement. À cet effet un péage d'environ 235 F, valeur moyenne pour tous types de véhicules, est prélevé par véhicule.

Les estimations préalables de fréquentation sont d'ores et déjà dépassées : 40 jours après sa livraison à la circulation, on enregistra le passage du millionième véhicule, (véhicule légers, poids lourds et cars), soit une recette de 300 millions de F.

En conclusion

Malgré des conditions de travail particulièrement sévères (délais, planning, météorologie, pluralité des chantiers de finition du pont, etc.), le complexe étanchéité/revêtement a pu être réalisé conformément aux stipulations du marché.

H. AESCHLIMANN (CH) ■

Traduit de l'allemand par M. Ph. Zündel

Barrières de sécurité : les nouvelles normes NF EN 1317-1 et 2

Introduction

À la fin de l'année dernière (1998), deux nouvelles normes sur les barrières de sécurité ont été publiées. Ceci ne constituerait pas un événement si ces deux nouvelles normes n'étaient des normes générales portant sur la performance des barrières de sécurité. Il s'agit des normes :

NF EN 1317.1	Dispositifs de retenue routiers	Terminologie et dispositions générales pour les méthodes d'essais
NF EN 1317.2	Dispositifs de retenue routiers	Classes de performance, critères d'acceptation des essais de choc et méthodes d'essai des barrières de sécurité

Elles sont le résultat d'un long travail d'harmonisation (presque 10 ans) entre les experts des divers pays européens concernés.

Elles apportent une évolution sensible dans le domaine des barrières de sécurité sur pont et en section courante et l'objet de ce petit article est de vous en faire une courte présentation. En effet, elles introduisent une terminologie légèrement différente, de nouvelles notions et de nouvelles classes de barrières qu'il importe de prendre l'habitude d'utiliser car cela sera, maintenant, le langage commun dans toute l'Europe.

Les niveaux de la normalisation ancienne

Jusqu'à maintenant, les barrières de sécurité étaient définies sur la base de la norme de performance NF P 98.409, dans laquelle on trouvait :

- **Les barrières de niveau 1c** : Retenue des véhicules légers de 1250 kg à une vitesse de 60 km/h sous un angle de 20°.
- **Les barrières de niveau 1b** : Retenue des véhicules légers de 1250 kg à une vitesse de 80 km/h sous un angle de 20°.
- **les barrières de niveau 1a** : Retenue des véhicules légers de 1250 kg à une vitesse de 80 km/h sous un angle de 30° ou 100 km/h sous 20°.

*Dans la Circulaire C 88-49 et certains textes antérieurs, on parlait alors de **glissières respectivement de niveau 3, 2 et 1.***

Ensuite, on avait :

- **les barrières de niveau 2b** : Retenue des cars de 12 t à une vitesse de 70 km/h sous un angle de 20°.

*Dans les textes antérieurs (C88-49 et GC77), c'était les **barrières normales.***

- **Les barrières de niveau 2a** visaient à retenir les poids lourds semi-remorque de 38 t à une vitesse de 70 km/h sous un angle de 20°.

*Dans les textes antérieurs (C88-49 et GC77), c'était les **barrières lourdes.***

La coexistence de deux normes de performance

Il est important de noter que, contrairement aux règles CEN, la norme NF P 98.409 n'est pas supprimée. Ceci a été demandé par la France pour pouvoir continuer à avoir des barrières de sécurité homologuées suivant cette norme dans l'attente de la mise en place des procédures de marquage CE conformément aux nouvelles normes EN, ces dernières n'étant pas complétées, pour le moment, par les éléments dits "harmonisés". La suppression de la norme NF P 98.409 aurait, en effet, conduit à une sorte de "vide juridique" particulièrement gênant.

Il convient cependant de profiter de cette période de cohabitation pour commencer à raisonner selon les nouvelles normes NF EN qui introduisent une terminologie légèrement différente de celle que nous avons l'habitude d'utiliser jusqu'à maintenant. Les principaux éléments à retenir sont décrits dans les deux paragraphes ci-après.

Cependant, en phase transitoire, les procédures d'homologation (et notamment les essais de type sur les barrières de sécurité) seront effectuées sur la base de ces nouvelles normes NF EN pour faciliter, le moment venu, le passage au marquage CE.

Terminologie

■ Dispositif de retenue

Le **dispositif routier de retenue** est un terme général désignant « les dispositifs de retenue de véhicules et les dispositifs de sécurité pour piétons utilisés sur les routes » (EN 1317.1).

Un **dispositif routier de retenue des véhicules** est un « dispositif installé sur les routes pour fournir un niveau de retenue pour un véhicule en détresse ; il peut être utilisé pour limiter les dégâts ou blessures des usagers de la route et des autres personnes à proximité » (EN 1317.1).

Ce dispositif de retenue de véhicule est appelé « **barrière de sécurité** ».

Le terme « *glissière* » est abandonné dans son sens général et n'est conservé que pour les profilés de type A ou B.

La norme EN 1317.1 distingue selon leur principe de fonctionnement :

- a. La **barrière souple** « qui se déforme lors d'un choc de véhicule et qui peut conserver une déformation après le choc ». Ceci inclut la barrière souple ayant une déformation en partie irréversible, de grandeur variable, et les barrières élastiques qui admettent une déformation dont la plus grande part est irréversible. Ces dernières sont très rares pour des raisons diverses (flèches, risques secondaires,...).
- b. La **barrière rigide** « qui présente une déflexion négligeable lors d'un choc de véhicule ». Si la déformation est un tant soit

peut importante, la barrière se brise et ne peut plus fonctionner.

On distingue aussi la **barrière simple** « conçue pour n'être heurtée que d'un seul côté » de la **barrière double** qui est « conçue pour être heurtée de chaque côté ».

Les nouvelles classes de performances

■ Généralités

La norme NF EN 1317-2 a introduit des classes de performance qui ne sont plus exactement les mêmes que celles de notre normalisation NF. Ces modifications sont le résultat d'un consensus au niveau européen.

Sur ouvrage d'art on distinguera trois niveaux principaux de sécurité :

- les garde-corps,
- les barrières de niveau Normal
- les barrières de niveau Haut.

■ Barrières de niveau N

Elles sont conçues pour assurer la retenue d'un **véhicule léger** rentrant dans la catégorie des véhicules légers du code de la route, les seules berlines de 1500 kg au maximum.

Leur niveau d'acceptation est celui défini dans les tableaux 1 et 2 de EN 1317.2 (Cf. tableau ci-dessous).

Ce niveau correspond, très sommairement, à la dénomination ancienne des « glissières » et aux barrières de niveau 1a et 1b citées page précédente.

Niveau	Type d'essai	Conditions de l'essai d'acceptation		
		Vitesse d'impact (en km/h)	Angle d'impact (en degrés)	Masse totale du véhicule (en t)
N1	TB31	80	20	1,5
N2	TB32	110	20	1,5
	TB11	100	20	0,9
H1	TB42	70	15	10
H2	TB51	70	20	13
H3	TB61	80	20	16
H4a	TB71	65	20	30 rigide
H4b	TB81	65	20	38 (Semi-remorque)

NB : Tous les essais de niveau H sont systématiquement complétés par un essai TB11 ceci afin de vérifier que le dispositif est apte à satisfaire aux spécifications pour la retenue des véhicules correspondant aux deux extrêmes du parc visé.

■ Barrières de niveau H

Leur niveau d'acceptation est celui défini dans les tableaux 1 et 2 de EN 1317.2 (Cf. tableau 1 qui donne un résumé des tableaux de la norme EN). Pour le détail des conditions d'essais et des

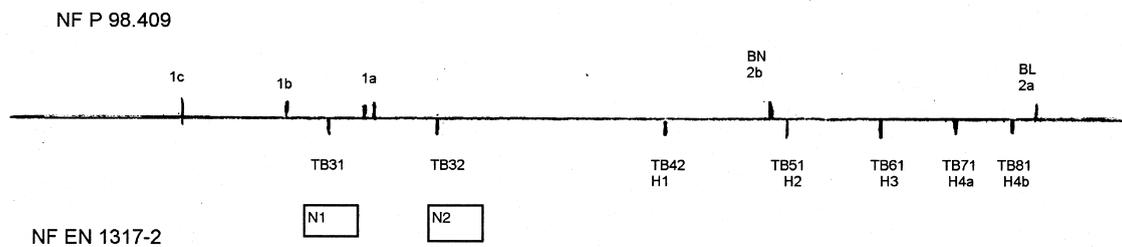
critères d'acceptation, on se reportera à la norme EN 1317-2. On notera que sous les dénominations H1 à 4 se retrouvent certains éléments de notre ancienne terminologie : H2 correspond à peu de chose près au niveau 2 b ou barrière Normale (c'est-à-dire aux barrières BN1-2, BN4, TETRA S13,...) et H4b à celui du niveau 2a ou barrière lourde. Le niveau H1 a été demandé par certains pays européens mais paraît ne pas correspondre à une partie de trafic nettement individualisé. Par contre, le niveau H3 est nouveau mais il s'avère mieux adapté aux données actuelles du trafic P.L. Il correspond, par exemple, aux barrières modèles BN4-16, Bhab et TETRA S16.

■ Correspondance NF P 98.409 et NF EN 1317

Il n'y a pas exacte correspondance entre les spécifications de la norme NF P 98.409 et les nou-

velles normes NF EN 1317. Il est donc difficile de positionner nos actuels dispositifs de retenue dans la nouvelle classification. Le graphique ci-dessous montre les correspondances que l'on peut admettre en terme uniquement d'énergie de choc entre la norme NF P 98.409 et la norme NF EN 1317.2. Cette comparaison n'a d'autre but que d'apporter une illustration à cette comparaison car les conditions des essais selon les deux normes sont parfois difficilement comparables : type et définition du véhicule, conditions d'essais, mesures lors de l'essai, etc.

Nous travaillons d'ailleurs, à l'intérieur de la Commission de normalisation française sur les barrières de sécurité, à proposer des règles d'équivalence entre les essais suivants la norme NF et ceux de la norme NF EN pour qu'elles soient acceptées au niveau européen (les autres pays ont les mêmes soucis).



Enfin, il reste à mettre en conformité nos guides sur les barrières de sécurité, particulièrement le guide GC 77. La parution du fascicule sur l'implantation des barrières de niveau H2-H3 sur les ponts devrait intervenir courant 99. Le fascicule sur les barrières de niveau N et sur TPC (N ou H1) est en préparation et nous espérons pouvoir le terminer début 2000. Reste à définir, dans un guide sur le choix du niveau de sécurité, les

ouvrages justifiables d'un garde-corps, d'une barrière de niveau N, du niveau H2 ou H3 ou H4. Ce travail est commencé mais il est délicat de définir les bornes et, pour se rattacher à ce qui se passe réellement sur les ponts, nous avons entrepris des études d'accidentologie. Nous espérons que ceci aboutira aussi courant 2000.

M. FRAGNET ■

Correspondance en énergie entre les essais NF et EN

FRAGNET Michel
Ingénieur
Cellule Equipements
S.E.T.R.A. - CTOA
Tel : 01 46 11 32 13

Etude du comportement vibratoire des passerelles lors du passage de piétons

Introduction

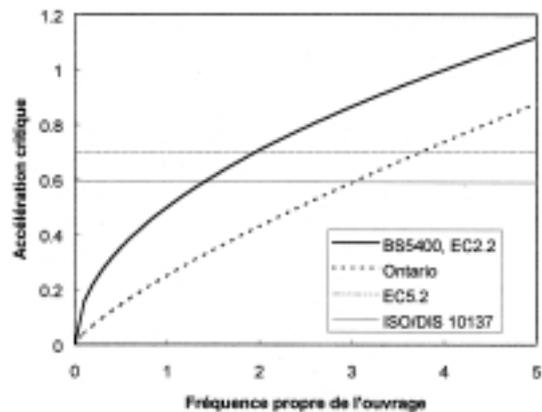
Les passerelles sont mises en vibration par le passage des piétons. Quand le rythme de la marche concorde avec une fréquence propre de l'ouvrage, ce dernier entre en résonance : les oscillations s'amplifient et peuvent atteindre des niveaux importants. Ceci n'entraîne généralement pas de sollicitations excessives dans la structure mais, dans certains cas, l'utilisateur ressent un inconfort qui se manifeste par une perte de confiance dans la résistance de la passerelle ou par le « mal de mer ». La tendance actuelle à l'audace architecturale et à l'augmentation du trafic sur ces installations, notamment en zone urbaine, conduisent à l'augmentation des problèmes de vibration. Dans la plupart des projets récents, le confort de l'utilisateur est à prendre en considération. Si les règles françaises sont muettes sur la question, dans les Eurocodes, un état-limite de service (ELS) de vibration est introduit. Les Eurocodes 3 et 4, s'appliquant respectivement aux constructions métalliques et aux structures mixtes, font référence aux parties 2 des Eurocodes 2 (EC2-2 : ponts en béton) et 5 (EC5-2 : ponts en bois). Ces derniers proposent un modèle de charge représentant l'action du piéton. Le principe des vérifications consiste alors à :

évaluer l'accélération verticale supportée par un piéton et

à la comparer à une accélération critique traduisant le critère de confort.

Critères de confort

Pour être utilisé par l'ingénieur, le confort doit être interprété à partir d'une grandeur physique. Pour les structures et le type d'actions étudiées, c'est l'accélération qui semble la plus représentative. Le critère de confort est alors représenté par une accélération critique, a_{crit} , qu'il convient de ne pas dépasser et qui constitue le seuil d'inconfort. Plusieurs critères de confort ont été proposés. Les valeurs qui ont été intégrées à divers règlements sont récapitulées dans le tableau ci-contre. f_0 représente la fréquence de vibration de la passerelle. Dans ce tableau, on retrouve le règlement anglais (BS5400), les diffé-



rents Eurocodes (EC2-2 et EC5-2) et le règlement de l'Ontario (ONT83). Le diagramme présente une comparaison de ces critères en fonction de la fréquence de vibration. Des écarts importants apparaissent. Pour la marche, il semble qu'un consensus se dégage autour de $0,6-0,7 m/s^2$; l'ONT83 propose des valeurs un peu plus basses. Pour les autres types de chargements (courses et sauts), les valeurs varient avec des écarts pouvant atteindre 50 %. Dans la littérature scientifique le confort est généralement défini en fonction de la fréquence de vibration. Aussi les critères de l'EC2-2 et du BS5400 paraissent-ils plus adaptés pour une large gamme de fréquence compte tenu que l'ONT83, qui lui aussi propose aussi une variation de a_{crit} en fonction de f_0 , est assez bas par rapport aux autres critères dans les gammes de fréquence correspondant à la marche.

Règlement	a_{crit}
BS5400 et EC2.2	$\frac{1}{2}\sqrt{f_0}$
Code de l'Ontario	$\frac{1}{4}f_0^{0,78}$
EC5.2	0,70
ISO/DIS 10137	0,59

Calcul de l'accélération maximale

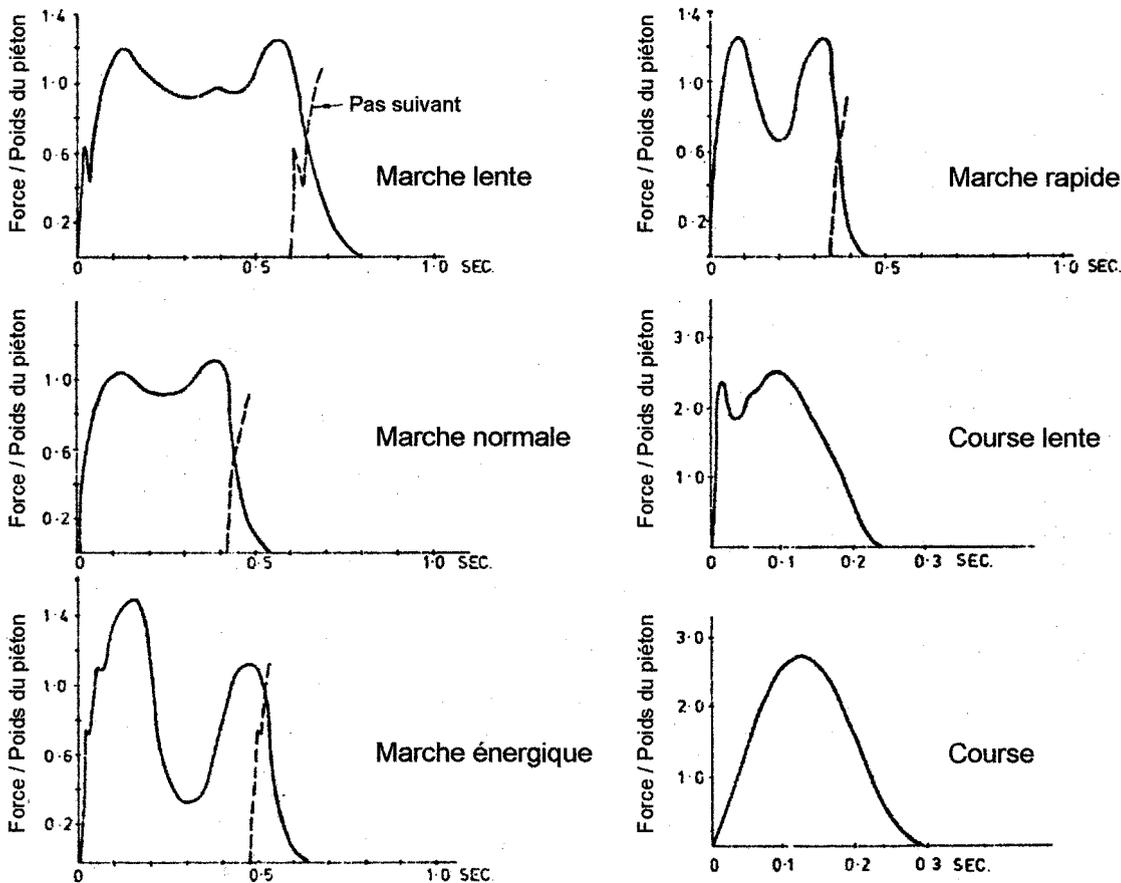
■ Éléments théoriques

Le pas du piéton est une action ponctuelle. On peut aussi représenter cette action de manière continue et non plus discrète, ce qui est plus facile à utiliser pour des calculs analytiques. En

Comparaison des critères de confort

Critères de confort

Force appliquée par les piétons suivant le rythme de la marche et de la course



supposant que le piéton se déplace à la vitesse v , son action est représentée à l'aide du produit d'une composante temporelle $P(t)$, et d'une composante spatiale $\delta(x-vt)$

$$P(x, t) = P(t) \times \delta(x - vt) \quad (1)$$

où δ est une fonction telle qu'en $x = vt$, l'action du piéton vaut $P(t)$ et qu'ailleurs, elle est nulle. La composante temporelle décrit les chargements représentés à la figure ci-dessus. On peut aussi la mettre sous la forme d'une série de Fourier :

$$P(t) = P \times \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k \sin(k\omega t - \phi_k) \right] \quad (2)$$

où la pulsation ω est proche de 4π pour la marche (correspondant à une fréquence de 2 Hz). L'intégration de l'équation du mouvement est effectuée par superposition modale de la réponse au chargement décomposé en série de Fourier (eq. 2). Néanmoins, le traitement complet est en dehors du sujet de cet article (voir [1] pour une démonstration complète). Dans le cas général, la réponse analytique ne présente pas une forme simple facilement interprétable. Il est donc intéressant d'étudier le problème d'une

poutre sur deux appuis dont les modes de flexion sont :

$$\phi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{mL}} \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (3)$$

et les pulsations de chaque mode sont :

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (4)$$

On se limite à la réponse dans un seul mode n , et on suppose que la $k^{\text{ème}}$ harmonique du chargement est en résonance avec ce mode. Dans un premier temps, on calcule la réponse d'un piéton qui marche « sur place » à la position $x = L / 2n$ pendant le temps de passage sur la passerelle qui vaut L/v . Alors la force généralisée dans le mode n (correspondant à la charge du piéton dans ce mode) vaut :

$$P_n(t) = \sqrt{\frac{2}{mL}} P (1 + \alpha_k \sin(\omega_n t)) \Delta(t) \quad (5)$$

où $\Delta(t) = 1$ quand $0 < t < L/v$ et 0 sinon. La partie dynamique (variable en fonction du temps) étant à la résonance, on peut considérer que la partie statique (qui ne varie pas dans le temps) donnera une réponse négligeable en

terme d'accélération. On montre (voir [1]) qu'entre $t = 0$ et $t = L/v$ la réponse en terme d'accélération est :

$$\ddot{u}\left(\frac{L}{2n}, t\right) = \frac{\alpha_k P}{\xi_n m L} [1 - e^{-\xi_n \omega_n t}] \cos(\omega t) \sin\left(n\pi \frac{x}{L}\right) \quad (6)$$

où ξ_n est le ratio d'amortissement critique de la passerelle dans le mode n . L'accélération est maximale pour $x = L/2n$ quel que soit t . Soit ε le temps tel que $\cos \omega_n(L/v - \varepsilon) = 1$. On peut considérer que $L/v \gg \varepsilon$ et qu'ainsi la partie exponentielle est peu affectée par la valeur de ε . Aussi la valeur maximale de l'accélération vaut elle :

$$a_{max} = \frac{\alpha_k P}{\xi_n m L} [1 - e^{-\xi_n \omega_n T}] \quad (7)$$

où $T = L/v$. On peut exprimer T en fonction de N , le nombre de pas du piéton sur la passerelle, et de ω_n : $N = L/L_p$ où L_p est la longueur moyenne d'un pas et $v = \omega_n L_p / 2\pi$ donc $T = 2\pi N / \omega_n$. L'accélération maximale vaut alors :

$$a_{max} = \frac{\alpha_k P}{\xi_n m L} [1 - e^{-2\pi \xi_n N}] \quad (8)$$

Pour la première harmonique de la marche, on prendra $\alpha_1 = 0,4$, et pour la première harmonique de la course on prendra $\alpha_1 = 1,6$. Les autres harmoniques sont généralement négligeables.

Nous venons de mettre en évidence l'expression générale de l'accélération maximale ressentie par un piéton « marchant sur place ». On constate ici que l'accélération est le produit d'une contribution permanente et d'une partie transitoire.

La partie permanente qui est :

$$\frac{\alpha_k P}{\xi_n m L}$$

dépend du rapport du poids du piéton au poids de la passerelle, de la valeur du coefficient de Fourier de l'harmonique et du coefficient d'amortissement critique.

La partie transitoire qui est :

$$[1 - e^{-2\pi \xi_n N}]$$

dépend de l'amortissement et du nombre de pas sur la passerelle.

La réponse de la passerelle augmente petit à petit pour passer de 0 à $\alpha_k P / \xi_n m L$. A la limite, si un seul pas est posé, le facteur multiplicatif transitoire vaut quasiment 0 et la réponse est quasi nulle. À l'inverse, si N est très grand, le terme en

exponentiel tend vers 0 et le facteur transitoire tend vers 1. Alors l'accélération atteinte est $\alpha_k P / \xi_n m L$.

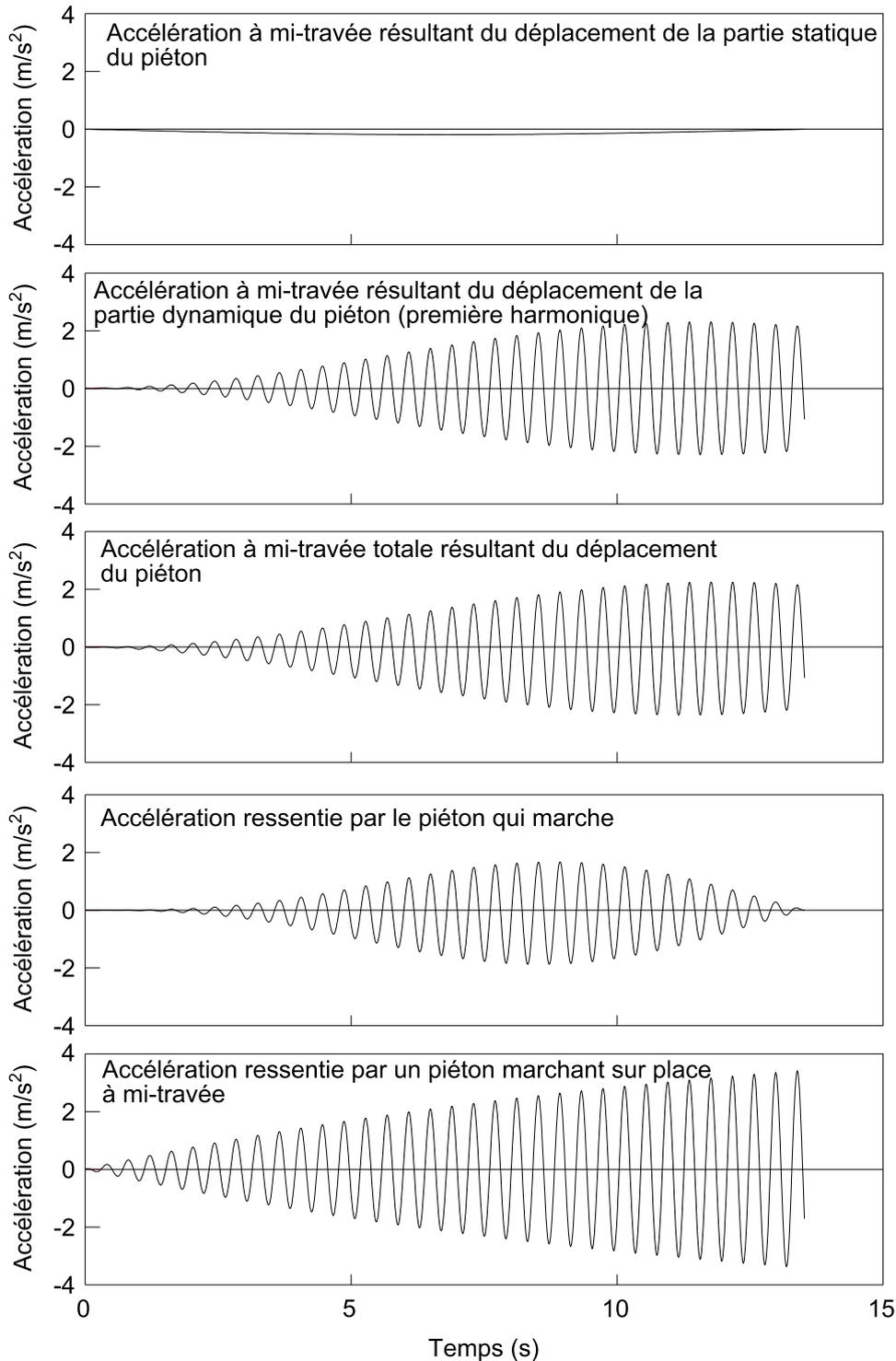
On peut calculer de manière exacte la réponse pour un piéton se déplaçant sur la passerelle. Sur plusieurs passerelles étudiées en incluant un grand nombre de modes, les résultats sont convergents. Pour une passerelle de fréquence propre 2,45 Hz, Nous présentons à la figure page suivante la réponse de la passerelle en supposant le piéton cadencé à 2,45 Hz. Cinq graphiques sont présentés :

- l'accélération à mi travée produite par le déplacement de la charge P avec une vitesse v (partie constante de $P(t)$) ;
- l'accélération résultant de la première harmonique ;
- l'accélération totale ;
- l'accélération ressentie par le piéton se déplaçant sur l'ouvrage ;
- l'accélération produite pour un piéton marchant sur place en ne considérant qu'un mode.

Des quatre premiers graphiques on constate que :

- la partie statique de $P(t)$ ne produit qu'une faible accélération et c'est de la première harmonique que résulte l'essentiel de la réponse ;
- la réponse totale est d'abord faible lorsque le piéton commence à traverser la passerelle, puis à mesure qu'il se rapproche de la mi-travée, l'accélération augmente rapidement (avec une forme comparable à celle du piéton marchant sur place). Lorsque le piéton s'en éloigne, son efficacité diminue et l'accélération diminue. On est déjà presque en régime d'oscillation libre amortie ;
- Il existe peu de différence entre l'accélération à mi-travée et l'accélération subie par le piéton qui se déplace sur la passerelle. Le rapport entre les deux accélérations est généralement proche de 0,8.

Si l'on compare maintenant les graphiques 3, 4 et 5, on observe que l'accélération maximale atteinte lorsque le piéton se déplace est inférieure à l'accélération obtenue dans le cas de la « marche sur place ». Ce résultat paraît logique puisque c'est à mi-travée que la marche du piéton met le plus aisément la passerelle en mouvement. Ce résultat est confirmé par de



nombreux autres exemples numériques. En général le rapport λ entre les deux accélérations est proche de 0,7. Compte tenu du facteur de 0,8 à intégrer (voir plus haut), on utilise $\lambda = 0,6$.

Généralisation à d'autres types de structure

Pour une passerelle assimilable à une poutre sur deux appuis, l'accélération maximale vaut donc

$$a_{max} = \frac{\alpha_k P}{\xi_n m L} [1 - e^{-2\pi\xi_n N}] \lambda \quad (9)$$

avec λ , le rapport entre la réponse du piéton marchant sur place et le piéton traversant la passerelle. Dans le cas de passerelles dont les modes sont différents de celui du premier mode de la passerelle sur deux appuis, la même approche est applicable. Pour tenir compte de la forme des modes qui dépendent de la géométrie, on utilise généralement un facteur de forme K dépendant du nombre de travées et du balancement des travées. Alors, l'accélération peut s'exprimer de manière simplifiée par :

$$a_{max} = \frac{\alpha_k P}{\xi_n m L} [1 - e^{-2\pi\xi_n N}] \lambda K \quad (10)$$

Pour une poutre à deux travées vibrant dans son premier mode (deux ventres) $K = 0,9$ et pour une poutre à trois travées identiques (trois ventres), on prendra $K = 0,8$.

Accélération subie par un groupe de piétons et par une foule

Il est pratique de diviser le traitement des groupes de piétons en 3 problèmes distincts :

a. **Un petit groupe de piétons marchant en cadence** au même endroit (sur une ligne orthogonale à l'axe longitudinal de l'ouvrage). On peut alors considérer que l'accélération produite par n piétons, $a_{max,n}$ peut s'exprimer en fonction de l'accélération produite par un piéton, a_{max} :

$$a_{max,n} = n a_{max} \quad (11)$$

b. **Un petit groupe de piétons qui ne marchent pas en cadence.** En considérant la fréquence de marche des piétons distribuée avec une loi de poisson, on montre (voir [2]) que l'accélération maximale est :

$$a_{max,n} = \sqrt{n} a_{max} \quad (12)$$

c. **Un flot continu de piétons.** Ce problème est très différent des précédents, car dans ce cas, on peut considérer qu'un régime permanent est atteint. De plus, des études expérimentales réalisées par Fujino et al. (1993) montrent que pour les passerelles comportant un grand nombre de piétons, ceux-ci se mettent à marcher naturellement en cadence de sorte que le facteur multiplicatif n'est plus valable. Une densité de 1,6 à 1,8 personnes/m² est un maximum pour que la marche soit possible. Néanmoins, il semblerait que dans la pratique

une valeur raisonnable soit de 1 personne/m² marchant à une vitesse moyenne de 1,5 m/s et à une fréquence moyenne de 2 Hz. En se basant sur les travaux de Fujino et al. (1993) [2] on peut écrire que :

$$a_{max,n} = 0,2 n a_{max} \quad (13)$$

On notera que la différence entre $0,2 n$ et \sqrt{n} peut s'avérer importante. À partir de 25 piétons c'est $0,2 n$ qui est prépondérant. Cette équation est fondée sur les observations des vibrations latérales mais les mouvements horizontaux et verticaux étant généralement corrélés, on peut donc étendre ce résultat. Avec 1 piéton/m², on obtient :

$$a_{max,n} = 0,2 S n a_{max} \quad (14)$$

où S est la surface utile du tablier. On notera que l'équation (14) conduit à des accélérations très importantes. Dans l'immédiat, il n'existe pas d'autres données expérimentales pouvant infirmer ou confirmer les valeurs de Fujino et al. Concernant ces chargements de foule, il convient de mentionner que bien souvent ce sont les vibrations latérales qui posent problèmes et dans les études de passerelles soumises à des foules denses, il faudra aussi s'intéresser à ces mouvements.

Méthode de calcul réglementaire

Nous allons voir dans cette partie comment ces éléments théoriques ont été introduits dans les règlements.

■ Eurocode 2 partie 2 (EC2-2)

Le calcul de l'accélération se fait en appliquant une charge cyclique ponctuelle F se déplaçant le long de la travée principale du tablier à la vitesse constante v , et définie par :

$$F = 180 \sin(2\pi f_0 t) \text{ et } v = 0,9 f_0$$

Avec F en Newton, f_0 en hertz et v en m/s. Aucune méthode de calcul simplifiée n'est proposée dans l'EC2-2.

■ Eurocode 5 partie 2 (EC5-2)

L'accélération du piéton isolé est calculée en exerçant une charge cyclique ponctuelle F se déplaçant le long de la travée principale du tablier à la vitesse constante v , et définie par :

$$F = 280 \sin(2\pi f_{vert} t) \text{ et } v = 0,9 f_{vert}$$

Avec F en Newton, f_{vert} en hertz et v en m/s. L'EC5-2 permet d'utiliser une méthode simplifiée

pour le calcul d'accélération des passerelles simples :

L'accélération sous le passage d'un piéton

$$a_{vert,1} = \frac{165K1}{M\xi}(1 - e^{-2\pi n\xi}) \quad \text{en m/s}^2 \quad (15)$$

avec M , la masse de la structure en kg, $n = \frac{L}{0,75}$ nombre de pas pour traverser la portée principale de longueur L .

On retrouve les termes de l'équation (10) avec K le facteur de configuration (tableau ci-dessous)

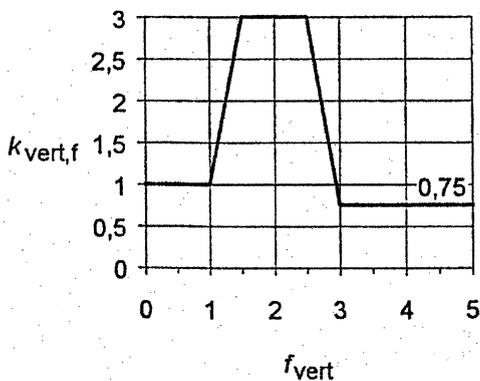
Configuration du pont	rapport L_1 / L	facteur K
	-	1.0
	-	0.7
	1.0	0.6
	0.8	0.8
	0.6 ou moins	0.9

et $165 = 700 \times 0,4 \times \lambda$ avec $\lambda=0,59$.

Pour le calcul de l'accélération d'un groupe de piéton ou d'une foule, on utilise les deux équations suivantes

$$\begin{cases} a_{vert} = a_{vert,1}k_{vert,f} & \text{pour quelques piétons} \\ a_{vert} = 0,027Lba_{vert,1}k_{vert,f} & \text{pour un flot continu de piétons} \end{cases} \quad (16)$$

avec $k_{vert,f}$ = facteur dynamique



Ce facteur dynamique permet de prendre en compte l'effet d'un petit groupe de piétons (une dizaine car $\sqrt{10} \approx 3$) qui ne marchent pas en cadence. Une amplification dynamique n'est enregistrée que si la fréquence de la passerelle est proche de 2 Hz. Ceci semble naturel puisque la cadence de la marche des piétons est centrée

autour de 2 Hz. Il paraît en effet peu probable qu'un groupe d'une dizaine de piétons marche à 3 Hz en moyenne.

Concernant le chargement de foule (flot continu de piétons) le facteur 0,027 correspond à une densité de 0,4 piéton / m² en utilisant l'équation de Fujino et al., ce qui est déjà fort dense.

L'EC5-2 propose aussi une méthode pour le calcul des vibrations latérales qui est presque identique.

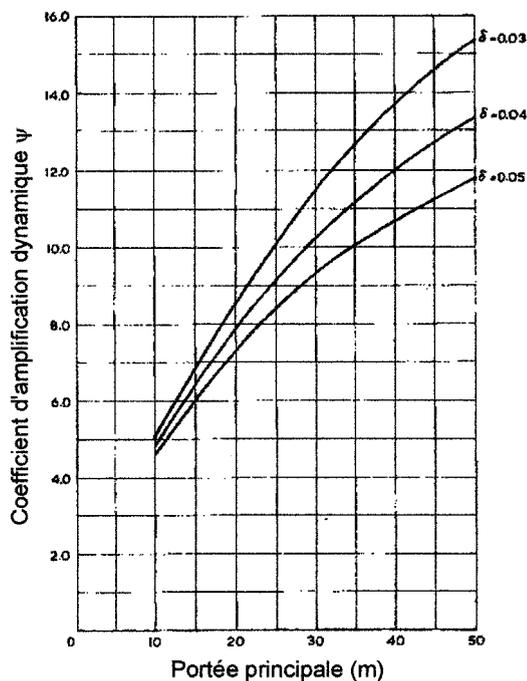
■ BS 5400 et ONT 83

Dans le BS5400, l'action du piéton est représentée par une force cyclique identique à celle prise dans l'EC2-2. Pour les passerelles simples, on peut déterminer l'accélération avec l'équation :

$$a = 4\pi^2 f_{\delta}^2 y_s K \psi \quad (17)$$

avec

K = facteur de configuration (tableau ci contre),
 ψ = coefficient dynamique (figure ci-dessous où δ est le décrement logarithmique, $\delta=2\pi\xi$),
 y_s = déplacement vertical maximal sous l'effet d'une charge statique de 700 N placée à mi travée.



Pour une poutre sur deux appuis

$$y_s = \frac{PL^3}{48EI}$$

Et la première fréquence propre vaut

$$\omega_0 = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$$

En remplaçant dans (17), il vient

$$a = \frac{\pi^2 P}{48mL} K \psi$$

Par identification avec (8) en prenant $\alpha_k = 0,4$, on obtient

$$\psi = \frac{19,2}{\pi^4 \xi} \lambda [1 - e^{-2\pi \xi N}] \quad (18)$$

En prenant $L_{pas} = 0,9$ m, pour $L=50$ m et $\delta = 0,03$ on devrait trouver $\xi = 15,3$ (d'après l'abaque précédente). Or cela conduit à une valeur de $\lambda = 0,457$, ce qui est une valeur anormalement basse. Pour une poutre sur deux appuis, le résultat d'un calcul temporel du passage de la force recommandée par le BS5400 conduit à $\lambda = 0,57$. L'équation simplifiée n'est pas en adéquation avec le modèle de charge général et sous estime les vibrations par rapport à un calcul plus précis. Il ne nous semble donc pas souhaitable d'utiliser directement cette méthode simplifiée.

■ Comparaison des méthodes réglementaires

En premier, il est intéressant de comparer les modèles de charge. On note une divergence importante entre le modèle de charge de l'EC5-2 et ceux l'EC2-2 et du BS5400. Si l'on revient à l'effet d'un piéton (eq. 2), et en se limitant à la première harmonique, pour un piéton de 700 N, la force dynamique est $0,4 \times 700 = 280$ N (où 0,4 est le coefficient du premier terme de la décomposition en série de Fourier. L'origine de la force de $180 \sin(\omega t)$ (EC2-2 et BS 5400) n'est expliquée dans aucun document. Aussi, dans l'immédiat et en absence de justifications, on utilisera une force de $280 \sin(\omega t)$ comme cela est proposé dans l'EC5-2.

Comme nous l'avons montré, pour le calcul approché de l'accélération maximale, la méthode de l'EC5-2 s'appuie sur une approche théorique, même dans l'application des facteurs de forme proposés. Enfin, la méthode du BS5400 ne paraît pas adéquate. Elle conduit à sous-estimer les accélérations maximales.

Les groupes de piétons et la foule sont traités par l'EC5-2 uniquement. La méthode reflète bien

l'état des connaissances actuelles, même si celles-ci sont très limitées. Pour les foules très denses (passerelles dans des installations sportives ou les desservant) on pourra être amené à utiliser une plus grande densité que celle proposée par l'EC5-2. Celle-ci devrait être précisée dans le marché.

En conclusion, seul l'EC5-2 propose un traitement complet et s'appuyant sur des bases théoriques satisfaisantes pour la justification de l'état limite de vibration des passerelles. Le modèle de charge proposé par le BS5400 semble insuffisant et la méthode simplifiée qui l'accompagne sous-estime les accélérations.

■ Exemple d'une passerelle inconfortable

La passerelle que nous allons traiter dans cet exemple a posé de nombreux problèmes d'inconfort. Dès la construction, l'entreprise a été amenée à modifier la structure afin de réduire les vibrations. Néanmoins, l'ouvrage vibre encore beaucoup. Cette passerelle est constituée d'une travée unique isostatique de 30 m de portée. La structure porteuse est un bipoutre en acier. Elle est recouverte d'un platelage en bois. La masse linéique est de 353 kg/ml (platelage compris) et l'inertie est $0,00352$ m⁴. La masse totale du tablier est de 10,6 t et la surface de tablier utilisable par les piétons est de 45 m². La flèche statique sous une charge de 700 N à mi travée est de $5,593 \times 10^{-4}$ m.

Pour le calcul de la fréquence de vibration de la passerelle à vide, on utilise l'équation (4).

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$$

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{200000 \times 0,00352}{353 \times 30^4}}$$

$$\omega_n = 15,487 n^2$$

On obtient un premier mode à 2,465 Hz. Les modes supérieurs sont au delà de 5 Hz. Ils ne poseront donc pas de problème d'inconfort. Un flot continu représente $45 \times 0,4 = 18$ personnes. Le poids de 18 piétons est de $18 \times 70 = 1260$ kg ce qui est faible par rapport au poids du tablier, mais pas négligeable. La fréquence du premier mode diminue de 2,465 à 2,33 Hz.

Les méthodes simplifiées sont tout à fait applicables dans ce cas simple.

▲ Eq. 15 (EC5-2) :

$$a_{vert,1} = \frac{165K1}{M\xi} (1 - e^{-2\pi n\xi})$$

$$a_{vert,1} = \frac{165 \times 1,0}{10600} \frac{1}{0,005} \left(1 - e^{-2\pi \frac{30}{0,75} 0,005}\right)$$

$$a_{vert,1} = 2,227 m/s^2$$

▲ Eq. 17 (BS5400) :

$$a = 4\pi^2 f_0^2 y_s K \Psi$$

$$a = 4\pi^2 2,465^2 5,593 \cdot 10^{-4} \times 1 \times 11,3$$

$$a = 1,516 m/s^2$$

On voit que dans les deux méthodes, l'accélération obtenue est très supérieure au seuil d'inconfort, ce qui confirme les observations. Par contre, la méthode simplifiée du BS5400 conduit à des accélérations plus faibles que celle de l'EC5-2. La méthode décrite au début de cet article conduit à une accélération maximale de 2,224 m/s pour un piéton de 700 N faisant des pas de 0,75 m. Le résultat est proche de la valeur obtenue avec la méthode simplifiée de l'EC5-2.

Pour les chargements de foule et de groupe, on utilise l'EC5-2 (eq. 16).

$$a_{vert,1} = a_{vert,1} k_{vert,f}$$

$$a_{vert,1} = 2,227 \times 3$$

$$a_{vert,1} = 6,681 m/s^2$$

$$a_{vert} = 0,027 L b a_{vert,1} k_{vert,f}$$

$$a_{vert} = 0,027 \times 45 \times 6,681$$

$$a_{vert} = 8,117 m/s^2$$

Ces accélérations ne sont pas acceptables. Néanmoins, dans le cadre du projet réel, aucun trafic important n'était prévisible et la vérification de l'état limite de vibration verticale sous l'action d'un piéton unique aurait été suffisante. Dans le cas contraire, on aurait été amené à modifier la solution.

Conclusion - Perspectives

Les passerelles pour piétons sont susceptibles d'entrer en vibration lors de la marche des piétons si leur fréquence propre est voisine de la fréquence du pas, soit dans la gamme : $f_0 \leq 5 Hz$. On notera aussi que des seconds modes peuvent poser des problèmes de vibration si leur fréquence est proche de celle de l'excitation (2 Hz). La prise en compte de cet état-limite peut entraîner des modifications de la solution retenue.

Le concepteur doit vérifier que les passerelles ne vibrent pas trop. Dans l'état actuel des connaissances, la méthode de justification proposée dans l'EC5-2 semble bien adaptée dans le cas d'ouvrages simples. Pour les ouvrages plus compliqués, il conviendra d'utiliser le modèle de chargement sous sa forme générale avec des méthodes d'analyse plus sophistiquées.

F. LEGERON - M. LE MOINE ■

Références

- [1] Légeron, F. « Calcul transitoire des passerelles sous chargements ponctuels : approche analytique » note interne DGO/SETRA.
- [2] Fujino, Y., Pacheco, B., Nakamura, S., Waarnitchai, P. « Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge », Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, Sept. 1993, pp. 741-758.

Calcul au flambement des arcs

Comparaison entre un calcul approché et un calcul en grands déplacements

Introduction

Plusieurs publications et études récentes font référence à des analyses au second ordre d'ouvrages d'art au moyen de calculateurs élastiques et linéaires. Le schéma de résolution utilisé s'appuie alors sur une méthode approchée. Nous nous proposons ici de comparer cette méthode à celles utilisant des formulations classiques en grands déplacements ou en grandes rotations.

Méthode approchée

Le schéma de résolution est le suivant :

- Etape 0 : géométrie = géométrie initiale.
- Etape 1 : application du chargement considéré et calcul des déplacements correspondants.
- Etape 2 : géométrie = géométrie initiale + déplacements de la structure.

Si convergence, arrêt du processus itératif ; sinon retour à l'étape 1.

La convergence peut être constatée dès que la norme des incréments de déplacements est inférieure à une certaine valeur.

L'attrait de cette méthode résulte de la facilité avec laquelle elle peut être mise en œuvre. Elle ne nécessite aucune nouvelle formulation de la rigidité des éléments. Le calcul linéaire de structures est tout simplement inséré dans un processus itératif. Intuitivement, on perçoit que cette méthode permet de prendre en compte, d'une certaine manière, le phénomène classique de second ordre résultant du déplacement des charges lors de la déformation de la structure. Ces phénomènes interviennent notamment dans les flambements eulériens des colonnes.

Pour obtenir le facteur de charge critique, la charge est multipliée par un coefficient qui est ajusté par essais successifs pour déterminer la valeur provoquant la divergence. Les valeurs de charge critique obtenues sont assez proches des charges critiques théoriques pour des piles et des pylônes. Souvent l'erreur est dans le sens de la sécurité car les valeurs de charge critique sont inférieures aux résultats théoriques. La méthode

est toutefois assez lourde, le schéma étant assez lent à converger.

Calculs en grands déplacements ou grandes rotations

Tout calcul en grands déplacements et a fortiori en grandes rotations doit être capable de prendre en compte plusieurs phénomènes inhérents à ce type d'analyse.

Le premier phénomène, on l'a vu, est lié au déplacement des charges lorsque la structure se déforme. Les efforts dans la structure s'en trouvent modifiés et un déséquilibre de flambement peut en résulter. Le deuxième phénomène est la prise en compte du raccourcissement propre des éléments constitutifs de la structure, raccourcissement dû aux déplacements de leurs extrémités. En d'autres termes, le cosinus de la rotation n'est plus assimilé à l'unité mais à un ordre supérieur. La différence entre un calcul en grands déplacements et en grandes rotations résulte du degré d'approximation des sinus et cosinus intervenant dans la composition des rotations des éléments. La formulation en grandes rotations utilise directement les sinus et cosinus sans aucune approximation. Celle en grands déplacements s'arrête en général au développement d'ordre 2.

La prise en compte des grands déplacements est, en particulier, nécessaire pour étudier l'équilibre des câbles porteurs des ponts suspendus. En effet, ceux-ci ne trouvent leur équilibre que pour un déplacement créant un système de forces du deuxième ordre en équilibre en chaque nœud.

Plusieurs formulations du type éléments finis existent pour prendre en compte ces phénomènes. L'une des plus utilisées est la description corotationnelle qui associe un repère de calcul à l'élément lors de son déplacement. Quelle que soit la formulation utilisée, le schéma de résolution consiste à calculer les efforts internes aux extrémités des éléments déplacés et à assurer l'équilibre en chaque nœud des forces extérieures et des efforts internes. Le schéma de résolution fait intervenir une rigidité tangente permettant de déduire les déplacements à partir

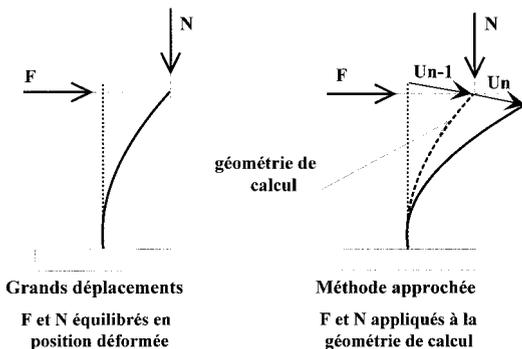
des efforts non équilibrés. Ce schéma est celui mis en œuvre dans les calculateurs en grands déplacements ou en grandes rotations tels que FINELG, SYSTUS+ et PCP.

Analyse des différences entre les méthodes approchée et exactes

La différence entre les formulations grands déplacements ou grandes rotations et la méthode approchée est méthodologique.

Dans le premier cas, on considère le phénomène de grands déplacements ou de grandes rotations de manière complète et déductive à partir des champs de déplacements. La convergence du système itératif est obtenue lorsque la structure est parfaitement en équilibre dans son schéma déformé compte tenu des efforts internes développés dans les éléments du fait des non linéarités géométriques.

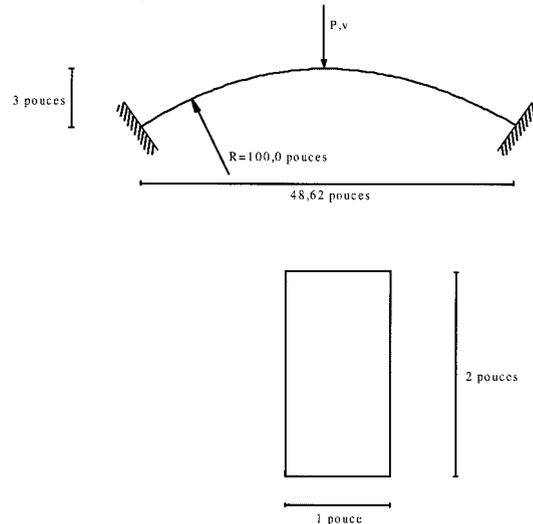
Dans le deuxième cas, seul le phénomène de modification de la rigidité est pris en compte. Le processus itératif est obtenu en formant une suite de déplacements U_1, U_2 et U_n telle que le déplacement calculé au premier ordre obtenu à une étape donnée sera utilisé pour former la rigidité de la structure à partir de laquelle sera calculé le nouveau déplacement. Après convergence, U_n est identique à U_{n-1} au test de convergence près. En d'autres termes, les itérations se poursuivent jusqu'à ce que le déplacement au premier ordre obtenu en appliquant le chargement total sur la structure déformée soit égal à celui qui existe entre la structure initiale et la structure déformée. Ce principe de calcul n'est basé sur aucun fondement scientifique.



Étude d'un arc

L'utilisation de la méthode approchée semble sans conséquence dommageable pour les études

de stabilité des piles et des pylônes pour lesquels les effets des déplacements de la charge sont prépondérants. Par contre, si l'on considère l'étude de la stabilité au flambement des arcs, le déplacement de la charge verticale intervient assez peu dans le phénomène de flambement, alors que les efforts internes sont primordiaux. À titre d'exemple, considérons un arc étudié en [3].



Géométrie de l'arc étudié

Le matériau constitutif de l'arc est censé avoir un comportement linéaire élastique, caractérisé par le module d'élasticité $E=70308$ MPa. L'étude du flambement de cet arc a été menée dans [1] avec FINELG. Par ailleurs, nous trouvons la solution théorique du diagramme effort-déplacement dans [3]. Nous avons mené de notre côté un calcul PCP [2] en prenant en compte les non-linéarités géométriques seules, un calcul SYSTUS+ avec la formulation correspondante et, avec ST1 en utilisant la méthode approchée. ST1 permet en effet de récupérer de manière assez simple les déplacements afin de modifier la géométrie initiale.

Le calcul avec FINELG a été mené à l'aide de seulement 4 éléments finis. En effet, l'élément utilisé est un élément de géométrie courbe. Dans PCP, la modélisation a été effectuée à l'aide de 10 éléments droits, afin de prendre en compte correctement la courbure de l'arc. En ce qui concerne le calcul SYSTUS+, nous avons dû discrétiser l'arc en 20 éléments pour obtenir des résultats corrects. Le calcul ST1 a lui été mené avec 10 et 20 éléments afin de montrer que la finesse de la discrétisation ne modifie pas le comportement de la méthode approchée, contrairement à une idée répandue.

Déformées après convergence

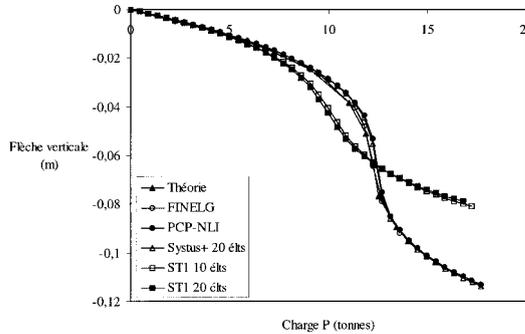
Évolution du moment fléchissant à la clef

Évolution de la flèche à la clef

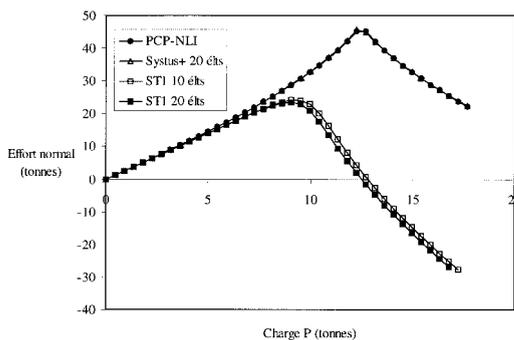
Évolution de l'effort normal à la clef

Jean GUAL
Ingénieur - DML
SETRA - CTOA
Tél : 01 46 11 32 06
Florent ROBERT
ITPE - DVT - SDOA
Conseil Général de Haute Savoie
Tél : 04 50 33 51 64

Les graphes ci-dessous résument les principaux résultats.



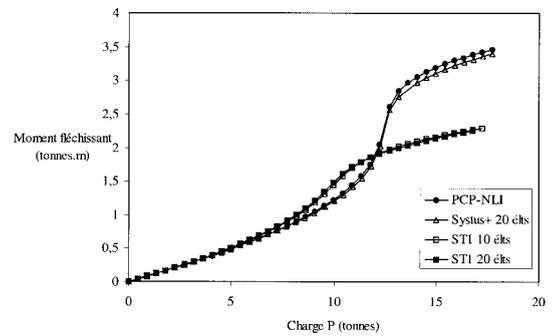
Les courbes des déplacements en fonction de la charge de FINELG, PCP et SYSTUS+ sont très proches de la solution théorique, et mettent en évidence le phénomène de flambement de l'arc aux alentours de 12 tonnes. Le flambement est beaucoup moins marqué dans le calcul ST1. Les déplacements sont surestimés avant flambement et sous-estimés après flambement.



La courbe des efforts normaux est encore plus significative. Alors que la courbe de l'effort normal des logiciels en grands déplacements ou grandes rotations progresse continuellement jusqu'à atteindre la charge critique, celle fournie par le calcul selon la méthode approchée décroît bien avant d'atteindre la charge critique théorique. Si bien que pour une charge de 12 tonnes, l'effort normal est presque nul par la méthode approchée alors qu'il vaut près de 45 tonnes par un calcul exact.

La courbe des moments fléchissants met également en évidence les écarts entre les deux approches avec une forte sous-estimation du moment fléchissant par la méthode approchée pour des charges importantes.

Les écarts sur les sollicitations pour des déformées finalement assez proches sont extrêmement significatifs du non-fondement



scientifique de la méthode approchée. Alors que durant la phase avant flambement le calcul en grands déplacements prend en compte la rigidité des contraintes initiales et fléchit moins que le calcul approché, après flambement, c'est le contraire qui se produit : l'affaiblissement de la structure provient de la réduction massive de la rigidité due aux contraintes initiales. Dans le calcul approché tous ces phénomènes sont masqués et les efforts de second ordre sont complètement faux.

Conclusion

Certes, les résultats présentés ici sont relatifs à un cas d'école. Néanmoins, ils sont qualitativement significatifs. De l'analyse de ces résultats on peut déduire que la méthode approchée ne s'applique pas indifféremment à tous les types de structure. Pour les structures qui font intervenir les évolutions des efforts internes dans l'équilibre en grands déplacements ou grandes rotations, les résultats qu'elle fournit sont très éloignés des calculs théoriques exacts. De fait, cette méthode est manifestement fautive notamment pour les arcs et par analogie pour les bow-strings. Elle ne devrait donc pas être utilisée. Il est préférable de réserver l'usage des calculateurs linéaires aux calculs au premier ordre...

J. GUAL - F. ROBERT ■

Bibliographie

- [1] De VILLE de GOYET, Vincent. L'analyse statique non linéaire par la méthode des éléments finis des structures spatiales formées de poutres à section non symétrique. Thèse de doctorat : Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 1989-1990. Pagination multiple.
- [2] ROBERT, Florent. Contribution à l'analyse non linéaire géométrique et matérielle des ossatures spatiales en Génie civil. Application aux ouvrages d'art. Thèse de doctorat : INSA de Lyon, 1999. 250 p.
- [3] STOLARSKI, H., BELYTSCHKO, T. Membrane Locking and Reduced Integration for Curved Elements. Transaction of the ASME Journal of Applied Mechanics, mars 1982, vol 49, p 172-176.

Protection anticorrosion des structures métalliques

Dans son numéro 27 de juillet 1997, la revue OUVRAGES d'ART du SETRA vous a déjà présenté la nouvelle Association pour la Certification et la Qualification en Peinture Anticorrosion : l'ACQPA. Un premier article a exposé les origines de l'association créée en 1994, ses principes fondateurs et ses objectifs.

L'année 1998 a vu fonctionner pleinement l'ACQPA, avec les trois comités de Certification souhaités par les membres fondateurs : **Produits, Opérateurs et Inspecteurs**.

Des articles viendront maintenant périodiquement faire le point sur les derniers développements, et sur les nouveautés de fonctionnement de l'ACQPA. Il est apparu que les rédacteurs de pièces écrites souhaitent avant tout mieux connaître les éléments à intégrer pour tenir compte de toutes ces récentes évolutions. C'est pourquoi nous consacrons aujourd'hui un article entier à ces questions.

D'autres articles suivront : nous vous informons notamment sur les décrets concernant l'environnement, qui feront évoluer à terme les techniques d'entretien in situ des structures métalliques peintes. Nous vous expliquerons aussi par quelles procédures les inspecteurs et les opérateurs sont certifiés, et nous vous tiendrons informés des évolutions de l'ACQPA.

En pratique, l'exigence d'un système certifié ACQPA réduit la liberté de choix aux 23 teintes de la carte ACQPA. Il s'agit cependant des 23 couleurs les plus fréquemment utilisées, et ce choix s'enrichira avec le temps. Les fabricants les ont formulées avec des pigments choisis pour répondre à l'exigence de la nouvelle norme concernant la stabilité de la couleur. Il est en pratique presque impossible, dans le cadre d'un marché particulier, de s'assurer que les formulateurs coloristes compétents soient mobilisés pour mettre au point une teinte non certifiée ACQPA présentant la même garantie de stabilité. En effet, le formulateur coloriste est au bout d'une impressionnante chaîne de sous-traitance, et donc bien loin du Maître d'Œuvre. Dans le cas général, il est souhaitable que dans son premier chapitre, le CCTP précise de plus les références des couleurs choisies parmi les vingt-trois. Il existe en effet des différences de coûts entre les pigments des différentes couleurs certifiées.

Soulignons enfin, que la certification ACQPA des opérateurs doit maintenant être prise en compte, et que le nouveau référentiel ACQPA intègre la certification des systèmes de protection C5M. Ces derniers n'étaient utilisés jusqu'à présent que pour les plates-formes de forage pétrolier en mer.

Incidence de l'ACQPA sur la rédaction des marchés

A - Dispositions générales

Dans l'attente de sa révision, le Fascicule 56 du CCTG reste applicable pour ce qui concerne les dispositions générales.

Rappelons que c'est le CCTP qui précise la catégorie d'ouvrage ou d'élément d'ouvrage en application de l'article 3 du CCTG. En l'absence de dispositions particulières du marché, le fascicule 56 définit à l'article 3 dans quelle catégorie classer un ouvrage. Par exemple, les poutres métalliques d'un ouvrage mixte acier-béton sont évidemment classées en catégorie 1 avec des épaisseurs supérieures à 8 mm. En revanche, les équipements - garde corps et candélabres - sont classés en catégorie 2 ou 3 selon l'épaisseur des aciers à protéger.

Le CCTP constitue également l'outil qui permet d'imposer un type de protection pour une catégorie d'ouvrage donné. Par exemple, le Maître d'Œuvre peut y exiger la galvanisation, ou un duplex galvanisation-peinture pour les garde corps, préalablement classés en catégorie 3. Les procédés de protection possibles figurent à l'article 2 du CCTG.

Dans le cas le plus courant, le type de protection souhaité est une mise en peinture, et l'on désire une longue durabilité de la protection anticorrosion. Il y a lieu d'exiger alors dans le CCTP un système de peinture de type A. Avant la création de l'ACQPA la liste des systèmes homologués par une commission interministérielle d'homologation (CIH) était régulièrement publiée par les journaux officiels.

Aujourd'hui, on choisit un système certifié par l'ACQPA. Leur liste est disponible au LCPC. La seule nouveauté consiste donc à ajouter dans le CCTP la référence ACQPA sous la forme suivante : **Pour telle partie de l'ouvrage, classée en telle catégorie (à préciser bien sûr...), la protection contre la corrosion est assurée par peinture sur acier mis à nu (par exemple), avec un système de type A certifié ACQPA.**

Tous les éléments sont ainsi définis pour utiliser le tableau pertinent de la garantie figurant à l'article 4 du Fascicule 56. Les tableaux de garantie du Fascicule 56 restent applicables hormis la garantie de stabilité de la couleur pour laquelle la publication simultanée des nouvelles normes NFT 34554-1 et 34554-2 vient modifier les écarts colorimétriques maximum admissibles ΔE au bout du délai de garantie (voir § B3-3-1 ci-après).

B - Système de peinture

■ B1 - Choix du système de peinture

Le CCTP précise la classe de certification dans laquelle le système de peinture doit être choisi.

L'ACQPA a repris les mêmes classes de certification que celles définies par la CIH mais en changeant l'appellation. La correspondance entre les anciennes et les nouvelles appellations est donnée dans le tableau ci-dessous.

Toutefois, il y a une nouveauté importante : la CIH n'homologuait des systèmes que pour les travaux neufs, avec décapage à l'abrasif et mise à nu complète de l'acier aux degrés Sa 21/2 ou Sa3. En revanche, l'ACQPA distingue la certification pour travaux neufs, avec le même type de préparation de surface que précédemment, et la certification pour les travaux de maintenance avec conservation de tout ou partie des anciennes peintures.

	CIH	ACQPA
Type de subjectile	A = Acier décapé G = acier Galvanisé Z = acier métallisé	A = Acier décapé G = acier Galvanisé Z = acier métallisé
Classe de corrosivité de l'environnement	R = Rural U = Urbain et industriel M = Maritime ED = immergé eau douce ES = immergé eau salée <i>rien d'équivalent à C5M</i>	C2 ≡ Rural C3 ≡ Urbain et industriel C4 ≡ Maritime Im2 = immergé eau douce et eau salée C5M ≡ Super maritime
Performance d'aspect	1 = parties vues 3 = parties non vues	V = parties Vues I = parties non vues (Invisibles)
Type de travaux	homologation pour des travaux neufs uniquement	N = travaux Neufs M = travaux Maintenance

Ainsi la modification au niveau du CCTP est relativement simple car il suffit de remplacer « on utilisera un système homologué dans la classe HAU1 » par « on utilisera un système certifié dans la classe C3ANV » dans le cas d'un ouvrage (ou partie d'ouvrage) situé en ambiance aérienne urbaine ou industrielle (C3), sur lequel on procède à un décapage avec mise à nu complète de l'acier (A N) et pour lequel on demande une performance d'aspect (V).

Toute chose égale par ailleurs, le même ouvrage en maintenance c'est-à-dire avec conservation de toute ou partie des anciennes peintures aurait demandé un système C3AMV.

■ B2 - Catégories de corrosivité

Par sécurité, il était de pratique assez courante de demander une catégorie de corrosivité supérieure à celle dans laquelle l'ouvrage se trouvait réellement. Par exemple, on demandait un sys-

tème « M » pour un ouvrage se trouvant en ambiance « U » urbaine ou industrielle.

Sur ce point, rien ne change avec l'ACQPA : C3 demandé pour un C2 réel, C4 demandé pour un C3 réel, etc. Cependant, une **nouvelle catégorie de corrosivité est maintenant disponible : la catégorie « C5M » - ambiance maritime très corrosive** - dont l'exemple typique est la plateforme de forage en mer. La catégorie C5M est divisée en 2 sous catégories, la C5Ma pour les parties aériennes, et la C5Mm pour les parties marnantes ou les parties soumises à éclaboussures.

Un Maître d'Œuvre ayant un ouvrage en bordure de mer (C4) peut être amené à demander du C5Ma en extrapolant les habitudes de sécurité. Cela n'a rien d'hérétique !... Mais la différence de corrosivité entre C4 et C5M est importante : il doit savoir que les systèmes « C5M » sont des

Tableau de correspondance entre homologation de la CIH et certification de l'ACQPA

options nettement plus « luxueuses » que les C4... et donc que les prix suivront !

■ B3 - Performance d'aspect, stabilité de la couleur de finition.

Cette demande de performance s'exprime par la présence de la lettre « V » comme partie Vue dans le numéro de certification du système de peinture. À l'inverse, l'absence de performance d'aspect correspond à un système ayant la lettre « I » comme partie Invisible dans son numéro de certification.

Ce point nécessite un développement plus détaillé car tout ou presque a été modifié par rapport à l'homologation de la CIH. Nous rappellerons donc d'abord les pratiques du temps de l'homologation, pour en venir aux changements liés à l'ACQPA avec leurs conséquences sur la rédaction des marchés.

▲ B3-1 - Rappel des pratiques du temps de l'homologation par la CIH :

La CIH prononçait ses homologations à partir d'essais réalisés sur des plaques grises pour les systèmes sur acier ou blanches pour les systèmes sur galvanisation.

Ensuite, un « agrément » était prononcé au coup par coup, selon la couleur projetée et en fonction :

- soit d'une composition pigmentaire,
- soit d'un essai de tenue aux UV.

Une base de données était tenue à jour. Elle permettait de ne pas devoir refaire la démarche

RAL 1003, 1015, 1021, 1028
RAL 2010
RAL 3001, 3004, 3009, 3020
RAL 5003, 5009, 5010, 5015, 5019, 5021
RAL 6005, 6011, 6018
RAL 7001, 7035, 8003, 9005, 9010

d'agrément au coup par coup si elle avait déjà été faite pour la finition en cause et comportait les données nécessaires à la traçabilité et au contrôle des livraisons (CIR).

Les marchés correspondant à cette procédure comportaient l'obligation d'envoyer, au LCPC, 3 ou 5 kg de la finition homologuée dans la couleur choisie. Cet envoi n'était fait que dans le cas où l'agrément sur simple examen de la composition pigmentaire était refusé.

▲ B3-2 - Ce qui a changé avec la certification ACQPA.

L'évaluation de la performance d'aspect est faite de la façon suivante :

- au moment des essais initiaux de certification, en observant le comportement de la finition figurant sur les fiches de certification. Pour les systèmes sur acier, la couleur est généralement le gris RAL7001. Sur galvanisation, c'est le blanc RAL9010.

Seuls les systèmes dont la finition (grise ou blanche) a un comportement satisfaisant sont certifiés « avec performance d'aspect » et peuvent comporter la lettre « V » dans leur numéro de certification.

- pour les couleurs de la finition d'un système « V » autres que celle figurant sur la fiche de certification, l'ACQPA a décidé de développer une « carte ACQPA des couleurs certifiées » composée des 23 couleurs ci dessous (voir la "Carte des Couleurs" en insert) :

série des jaunes
série des oranges
série des rouges
série des bleus
série des verts
série des gris, bruns, noirs et blancs

En se limitant du moins dans un premier temps à ces vingt-trois couleurs, l'ACQPA prononcera une certification « V » si la couleur en question satisfait le critère de performance donné dans la partie I de la nouvelle norme NF T 34-554 - Systèmes de peinture anticorrosion - Stabilité dans le temps des caractéristiques colorimétriques d'une peinture de finition pour ouvrage métallique. Ce critère consiste à respecter une différence totale de couleur (ΔE_{ab}) après une exposition d'un an en Floride. Le ΔE_{ab} à respecter dépend de la couleur et figure dans la norme

sous forme de 2 tableaux, l'un pour les références RAL et l'autre pour les références AFNOR. La partie 2 de la norme traite de la performance de stabilité de couleur sur ouvrage en service.

À cet effet :

- elle définit des stabilités relatives (couleur dite "uniforme") et absolue (couleur dite "constante") d'une peinture de finition,
- elle donne la méthode pour mesurer ces grandeurs sur ouvrage en service.

Ces stabilités relative et absolue correspondent, en fait, aux notions "d'altération non uniforme" et "d'altération uniforme" de la couleur des

tableaux de garantie du Fascicule 56. Ce point a une influence sur la rédaction du CCAP que nous verrons plus loin.

Ainsi, environ 600 plaques sont actuellement en Floride. En même temps, l'ACQPA a initialisé une base de données qui permettra le suivi des finitions certifiées c'est-à-dire celles ayant subi l'essai Floride ou étant en cours d'exposition (base comportant notamment les Caractéristiques d'Identification Rapide - CIR).

En outre, une finition certifiée par l'ACQPA comme conforme à NF T 34-554 partie I reçoit un étiquetage spécifique consistant, à ajouter la lettre « T » à la suite du n° ACQPA de certification du produit. Ces dispositions d'étiquetage sont effectives depuis le 1er janvier 1999.

Exemple :

BELACQPA RAL 5015
ACQPA n° 33599

Finition d'un système certifié « V » par l'ACQPA, de couleur RAL 5015. Elle fait partie d'un système remplissant les critères de performance anticorrosion mais elle ne figure pas dans la base de données des finitions ACQPA à caractéristiques colorimétriques stables.

BELACQPA RAL 5015
ACQPA n° 33599 T

Finition d'un système certifié « V » par l'ACQPA, de couleur RAL 5015. Elle fait partie d'un système remplissant les critères de performance anticorrosion et elle figure dans la base de données des finitions ACQPA à caractéristiques colorimétriques stables.

▲ **B3-3 - Comment traduire les nouvelles dispositions dans les pièces du marché (CCAP ou CCTP).**

La spécification d'un système avec finition à caractéristique colorimétrique stable s'accompagne, pour les pièces du marché, des dispositions suivantes :

● **B3-3-1 - Garantie d'aspect (CCAP) :**

Il faut rappeler que la garantie d'aspect (altération de la couleur) du Fascicule 56 du CCTG est applicable en précisant le type : garantie "normale" (5 ans sans altération non uniforme) et/ou garantie "spéciale" (garantie normale + 3 ans sans altération uniforme). Mais il faut préciser que les normes en vigueur ne sont plus celles figurant dans les commentaires du Fascicule 56 du CCTG mais la norme NF T 34-554 de 1998.

Il en résulte que :

- par dérogation, les écarts colorimétriques du Fascicule 56 (3 u. NBS pour les altérations non uniformes et 5 u. NBS pour les altérations uniformes) sont remplacés par l'écart colorimétrique (ΔE_{ab}) maximum admissible tel que défini par NF T 34-554 partie I. Si la couleur choisie n'est ni une nuance RAL, ni une nuance AFNOR, le (ΔE_{ab}) maximum admissible retenu pour la garantie est celui de la nuance RAL ou AFNOR la plus proche de la couleur finalement choisie.
- la méthode de mesure du respect de la garantie sur ouvrage en service est donnée par la partie II de la norme NFT 34-554. Le critère « altération non uniforme » du Fascicule 56 correspond à la « stabilité relative » d'une « couleur uniforme » tel que définie par NFT 34-554/2. Le critère « altération uniforme » du Fascicule 56 correspond à la « stabilité absolue » d'une « couleur constante » telle qu'elle est définie par la norme NFT 34-554/2.

● **B3-3-2 - Choix de la couleur (CCTP) :**

Si une performance d'aspect est recherchée, c'est-à-dire que la couleur ne doit pas subir d'altération :

- a. Rappeler dans le CCTP qu'une garantie d'absence d'altération de la couleur est demandée et précisée dans le CCAP,
- b. Exiger un système certifié par l'ACQPA et comportant la lettre « V » dans son n° de certification,
- c. Choisir si possible, la couleur parmi l'une des 23 de la carte ACQPA en précisant que la finition du système proposé par le titulaire du marché devra figurer dans la base de données ACQPA des finitions certifiées conformes à NF T 34-554/1.
Préciser que le certificat ACQPA concernant cette finition sera exigé, que le numéro ACQPA du produit figurant obligatoirement sur les emballages devra comporter l'extension.../T, et que les produits seront livrés accompagnés d'un certificat d'analyse montrant sa conformité avec le produit certifié (fourniture de la Fiche d'Identification Rapide porteuse des C.I.R. - Caractéristiques d'Identification Rapide).

Si la couleur choisie ne figure ni parmi les 23 de la carte ACQPA, ni dans la base de données ACQPA des finitions conformes à NF T 34-554/1, la stabilité colorimétrique de la finition n'est pas

certifiée par l'ACQPA. Si un Maître d'Œuvre doit prendre ce risque, il fait alors son affaire d'organiser un choix des pigments qui garantisse la stabilité colorimétrique qui convient au projet dont il est chargé. La garantie correspondra alors, espérons-le, à une réelle qualité de la teinte. Mais quelle que soit la valeur technique de la formulation des pigments, la garantie du Fascicule 56 reste de toute façon juridiquement en vigueur au titre des garanties particulières telles que prévues à l'article 4 du CCAG-Travaux, qu'il suffit de reprendre également à l'article 9.7 du CCAP : cette garantie engage donc la responsabilité de l'entreprise titulaire du marché.

C - Mise en oeuvre du système de peinture, certification ACQPA des personnels (opérateurs et inspecteurs).

Il s'agit ici de la certification de l'homme qui réalise directement le travail d'application des produits (opérateur) ou d'inspection des travaux (inspecteur). Il existe, par ailleurs, des certifications d'Entreprises ou de leur système qualité (par exemple : label « Qualibat » ou certification « ISO 9001 ou 9002 ») dont l'ACQPA ne s'occupe pas.

■ C1 - Rappel des dispositions du Fascicule 56 du CCTG :

Pour la mise en oeuvre des produits, les dispositions d'assurance qualité prévues par le Fascicule 56 sont :

- a. La présentation d'un programme d'exécution,
- b. La tenue d'un journal de chantier,
- c. L'organisation d'une épreuve de convenance,
- d. Un suivi d'exécution des opérations de préparation de surface et d'application des produits. De façon globale et résumée, ce suivi comporte des contrôles internes à la charge de l'entreprise (processus d'exécution) et des contrôles à la charge du Maître d'Œuvre (résultats obtenus).

Les nouvelles approches « qualité » avec les notions de PAQ, contrôles intérieurs propres à l'entreprise (interne et externe) et contrôle extérieur pour le compte du Maître d'Œuvre, les notions de points d'arrêts, points critiques, délais de convocation, traçabilité etc. sont apparues peu après la publication du Fascicule 56 (1986).

L'introduction de ces nouvelles approches sera l'un des points forts de la révision de ce Fascicule. En attendant, elles sont déjà appliquées sans trop de difficultés mais au coup par coup selon les chantiers.

■ C2 - Comment prendre en compte la certification ACQPA des opérateurs.

Plus de 700 opérateurs provenant de plus de 40 entreprises d'application sont actuellement certifiés ACQPA. La liste de ces entreprises est disponible à l'ACQPA - Secrétariat technique « opérateurs » - 10 rue du Débarcadère 75852 Paris cedex 17 - tél : 01 40 55 12 08/09 - fax : 01 40 55 11 95.

Les deux tiers environ de ces 700 opérateurs ont obtenu le niveau N1 (applicateur exécutant) et un peu moins d'un tiers est certifié au niveau N2 (chef d'équipe ou de chantier), ceci avec quatre options :

- a. préparation de surface
- b. application de peintures
- c. métallisation
- d. revêtements spéciaux ou spécifiques

L'ACQPA délivre à l'opérateur certifié un badge et un certificat précisant les niveaux, options et durée de validité.

Compte tenu de ces chiffres, on peut maintenant considérer qu'il n'est plus abusif ou discriminatoire d'exiger la certification ACQPA des opérateurs intervenants pour la préparation des surfaces ou l'application des produits.

Les dispositions pour prendre en compte cette certification sont simples car :

- a. *Toutes les dispositions actuelles du Fascicule 56 restent en vigueur,*
- b. *Il suffit d'exiger dans le CCTP, au chapitre concernant l'exécution des travaux, que les opérateurs intervenant pour la préparation des surfaces et l'application des peintures soient certifiés ACQPA niveau N1. Les chefs d'équipe et de chantier devront être certifiés ACQPA niveau N2.*

L'entreprise précisera dans son offre (programme d'exécution ou PAQ), les noms des opérateurs certifiés ACQPA susceptibles d'intervenir sur le chantier, ceci en précisant les niveaux, options et durée de validité du certificat.

Les badges seront ensuite exigés lors de l'épreuve de convenance et du déroulement de chantier.

D. ANDRE

Ingénieur
LCPC – PCM
Tel : 01 40 43 51 59

J. BERTHELLEMY

ITPE - DGO
SETRA - CTOA
Tel : 01 46 11 32 69

J. FUCHS

Chef Pôle Ouvrages d'Art
LRPC de Nancy
Tel : 03 83 18 41 31

G. MAIRE

Ingénieur
LRPC de Blois
Tel : 02 54 55 49 53

■ **C3 - Faut-il prendre en compte la certification des inspecteurs ?**

Leur cas est encore très différent de celui des opérateurs. Le nombre d'inspecteurs certifiés ACQPA / FROSIO est en effet assez faible puisque d'environ 30 (fin 1998). On peut espérer que fin 1999, ce nombre sera d'environ 80 (3 sessions de

formation et examen prévues en 1999). Si tel est le cas, il deviendra possible à l'aube du 3ème millénaire d'exiger la certification ACQPA / FROSIO pour l'inspecteur « externe » de l'entreprise... voire pour l'inspecteur « extérieur » du Maître d'Œuvre.

**D. ANDRE – J. BERTHELLEMY
J. FUCHS – G. MAIRE ■**

Évaluation des surfaces à peindre

Les ponts métalliques les plus courants sont en ossature mixte acier-béton. Dans le but de faciliter la mise au point de leurs dossiers, et pour permettre de contrôler les mètres de surface à peindre, le SETRA a établi avec les CETE de Lyon et de Nantes des abaques donnant pour un pont un ordre de grandeur correct des quantités de surface à protéger contre la corrosion.

L'abaque est établi sur la base de données concernant des ouvrages réels récents. La quantité recherchée n'est pas donnée directement. L'abaque fournit le rapport r entre la surface de l'ouvrage et la quantité de charpente. Ce rapport varie avec la portée des ouvrages, puisque l'on utilise évidemment des tôles de plus forte épaisseur pour les plus grandes portées. La grandeur X à introduire en abscisse est directement la portée déterminante l pour les ponts continus et les ponts en arc autoancré bow-string. Pour les travées isostatiques, on prendra $X=1,4 * l$ pour utiliser l'abaque et pour les ponts à deux travées la valeur intermédiaire $X= 1,3 * l$.

La morphologie des ouvrages nous a conduit à distinguer en gros trois types de structures :

● **les bipoutres les plus courants à entretoises :**

$$r = 2,5 + 250/x + 1000/x^2, \text{ en m}^2 \text{ par tonne d'acier.}$$

● **les bipoutres à pièces de pont, qui présentent pour un même tonnage davantage de surface à peindre :**

$$r = 3,0 + 350/x + 1500/x^2$$

● **les caissons pour lesquels c'est la surface totale qui est comptée - intérieur plus extérieur - même si la protection intérieure des caissons contre la corrosion est généralement plus facile à assurer que la protection extérieure :**

$$r = 3,5 + 450/x + 2000/x^2$$

L'abaque se trouve sur l'insert en couleur, au dos de la carte des 23 couleurs retenues pour certification par l'ACQPA.

Un nouveau produit informatique de gestion des ouvrages d'art

Vous savez certainement (grâce au bouche à oreille) que le SETRA et le Réseau Technique travaillent depuis quelque temps à l'élaboration d'un nouvel outil de gestion des ouvrages d'art. Quelques grands principes ont animé la conduite de ce projet :

- **L'Etat, le département et les autres** : Cet outil doit permettre la gestion des ouvrages d'art nationaux mais aussi répondre aux besoins spécifiques des collectivités territoriales, des sociétés d'autoroutes, des pays étrangers.
- **Un produit ergonomique**, écrit sous un environnement moderne, similaire à celui des produits bureautiques couramment utilisés.
- **Un véritable outil de gestion**, plus complet qu'une simple base de données, intégrant par exemple les fonctionnalités d'IQOA. Pour être efficace, il limite l'enregistrement des données à celles susceptibles de faire l'objet de traitement informatique. D'autres données peuvent néanmoins être incluses dans des champs commentaires.
- **Un instrument de communication** entre les subdivisions et la CDOA ; les acteurs du terrain disposeront d'outils spécifiques pour l'entretien courant. Les propositions d'actions de surveillance, d'études et de travaux seront formalisées et transmises par le logiciel, installé en réseau. L'exécution des actions sera suivie au travers de "chantiers", permettant de conserver la mémoire de ce qui est réalisé.

- **Un outil d'aide à la décision et de compte-rendu aux Maîtres d'Ouvrage** afin d'assurer la transparence vis à vis des donneurs d'ordre nécessaire à l'ajustement des politiques de maintenance.
- **Des fonctions modernes et sympathiques** comme, par exemple, la faculté de gérer une banque de photographies ou de plans.
- Ce projet avance ! Nous entrons bientôt dans la phase de validation des spécifications (pour ceux qui seraient plus habitués à la construction d'ouvrages d'art qu'au vocabulaire des projets informatiques, disons que les plans d'exécution sont terminés et que le coffrage est en place : il reste alors à ferrailer et à couler le béton).
- Cette fin d'année sera consacrée à la passation de marchés de développement. Au cours de l'an 2000, seront réalisés le développement et la validation du produit, sa mise sur sites pilotes ainsi que l'élaboration de toutes les actions d'accompagnement nécessaires à la réussite du projet : organisation de la formation, rédaction des documents techniques.... **Le logiciel sera disponible début 2001.**

Cependant, il nous manque l'essentiel : **un NOM !** Nous faisons appel à votre imagination, que nous savons fertile, pour des suggestions. Le gagnant se verra offrir un voyage à Paris pour inaugurer la première version.

Contacts :
Isabelle SCHALLER
 ITPE - DML
 SETRA - CTOA
 Tel : 01 46 11 32 36
Gérard DELFOSSE
 IDTPE - DML
 SETRA - CTOA
 Tel : 01 46 11 35 98

BON DE COMMANDE POUR RECEVOIR LES PUBLICATIONS DU CTOA

Retournez votre commande — ou faxez-la — à :
 Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
 Bureau de vente des publications • BP 100 - 92225 Bagneux Cedex
 Tél. 01 46 11 31 53 - Fax. 01 46 11 33 55

Je désire recevoir _____	exemplaires(s) _____	Nom et adresse du demandeur : _____
TITRE _____		_____
Réf. _____		_____
Prix Unitaire _____	Prix total _____	Tél. _____
_____	_____	Date _____
		Signature _____

Frais d'envoi (à ajouter au montant de la commande) : 15 frs pour toute commande inférieure à 150 frs, 25 frs pour toute commande égale ou supérieure à 150 frs
Mode de règlement (à réception de facture) : chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des recettes du Setra • Virement bancaire : relevé d'identité bancaire (RIB) :
 Code banque : 40071 • Code guichet : 92000 • N° de compte : 00001000261 • Clé RIB : 11 • Domiciliation : RGFIN Paris Nanterre

OUVRAGES D'ART CENTRE DES TECHNIQUES D'OUVRAGES D'ART

Ce bulletin de liaison vous intéresse... retournez le formulaire ci-dessous à :
 Bulletin de Liaison OUVRAGES D'ART - SETRA Communication
 46, Avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex

Nom : _____

Service, société : _____

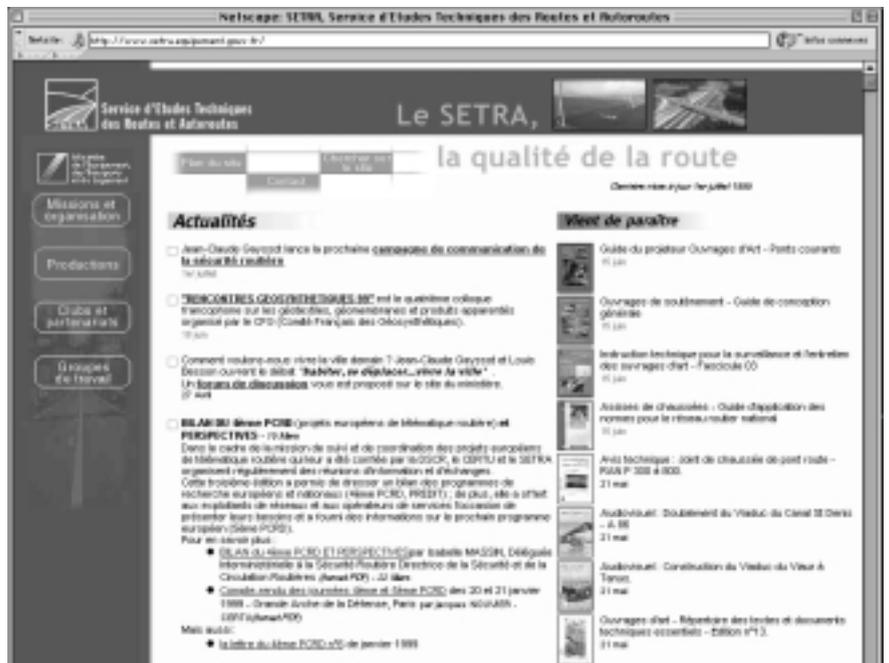
Adresse : _____

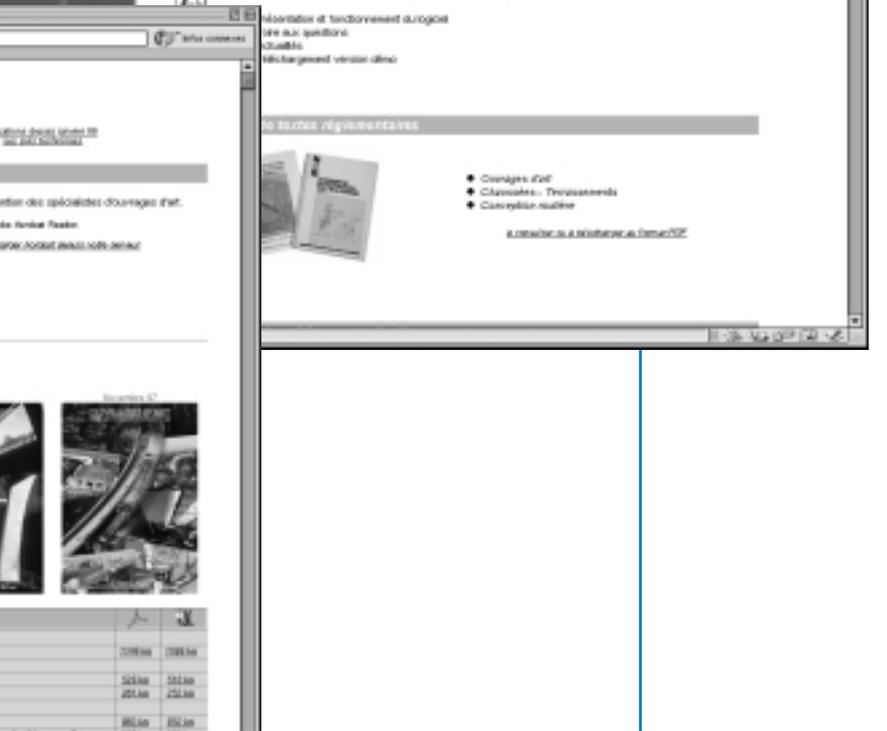
Tél. : _____ **Date :** _____

Désire être destinataire d'un exemplaire du bulletin de liaison OUVRAGES D'ART gratuit

Le Web du Setra...

Le Setra a son Web depuis quelques temps. Vous pouvez le consulter en tapant : <http://www.setra.fr>.







Informations brèves

■ Formation ENPC dans le domaine des ouvrages d'art

MATERIAUX ET PRODUITS

Formuler les bétons : La gamme des bétons modernes 5 et 6 octobre 99

CONCEPTION ET REALISATION

Concevoir et réaliser les ponts métalliques et mixtes 12 au 14 octobre 99

Les dispositifs de retenue de véhicules sur les ponts routiers (Session flash) 21 octobre 99

Calculer les bâtiments, les ponts et les ouvrages de génie civil en zone sismique 2 au 4 novembre 99

Concevoir et construire les passerelles piétonnes et cyclables 17 et 18 novembre 99

Pratique du calcul par éléments finis des ouvrages de génie civil 1 et 2 décembre 99

Conception générale des ponts – 1ère partie : les tabliers 7 et 8 décembre 99

Conception générale des ouvrages à structures bois : ponts, passerelles et bâtiments 21 et 22 décembre 99

ENTRETIEN ET REPARATION

Ponts en maçonnerie : Surveiller et diagnostiquer (1ère partie) 19 et 20 octobre 99

Ponts en maçonnerie : Surveiller et diagnostiquer (2ème partie) 16 et 17 novembre 99

QUALITE

La démarche Qualité dans le domaine des ouvrages d'art. Les fascicules 65A et 65B. 14 décembre 99

Concevoir et mettre en application un Plan d'Assurance Qualité 15 et 16 décembre 99

CYCLES INTERNATIONAUX

Concevoir, réaliser et réhabiliter les canaux d'irrigation et ouvrages hydrauliques (Paris) 22 nov. au 10 déc. 99

Maintenance des infrastructures portuaires et aéroportuaires 18 au 29 octobre 99

Ouvrages d'Art : dimensionnement, gestion et maintenance (Bamako) 27 sept. au 16 oct. 99

Eurocode 3 (Yamoussoukro) 13 au 24 septembre 99

- Renseignements et programmes détaillés des stages ENPC : 01 44 58 27 28
- Renseignements concernant les cycles internationaux : 01 44 58 28 28 ou 28 27.

■ Formation CTICM dans le domaine de la construction mixte acier - béton

Stage EC4/2 : Cycle Eurocode 4 : Module 2 : Poteaux et dalles 29 et 30 novembre 99

Stage 05.40/1: Actions climatiques : Neige 8 décembre 99

Stage 05.40/2 : Actions climatiques : Vent 9 et 10 décembre 99

- Renseignements et programmes détaillés des stages CTICM : Mme Clavaud 01 30 85 20 57

■ Formation CERIB dans le domaine des constructions en béton

Calcul des produits en BHP 18 novembre 99

- Renseignements et programmes détaillés des stages CERIB : Mme Castelli ou Mr Davignon 02 37 18 48 00

Le kiosque du SETRA

Publications

■ Répertoire des textes et documents techniques essentiels - Ouvrages d'art

Édition N° 13 - Janvier 1999

- Réf. P2199 - Prix : 70 F

Chaque année, le Centre des Techniques d'ouvrages d'art diffuse et remet à jour le répertoire des textes et documents techniques essentiels dans le domaine des ouvrages d'art. L'édition n° 13 de janvier 99 contient un ensemble de textes réglementaires et normatifs et de documents guides concernant la conception, l'exécution et la maintenance des ponts et soutènements (y compris fondations et équi-

pements), leurs matériaux constitutifs, ainsi que les tunnels.

Ce document ne vise pas à l'exhaustivité. Il est néanmoins assez complet et peut servir de guide pour la mise à jour d'une bibliothèque technique d'un ingénieur ou d'un bureau d'études spécialisé en ouvrages d'art.

Une liste récapitulative des normes citées est présente en annexe du répertoire.

■ Les ouvrages de soutènement

Guide de conception générale

- Réf. F9849 - Prix : 240 F

Ce document renseigne sur les principaux types d'ouvrages de soutènement existants et leur domaine d'emploi, pré-



sente les règles essentielles de conception de ces ouvrages, fait le point de la situation actuelle en matière de calcul et propose une démarche pour le choix d'une solution basée sur la prise en compte de l'importance de l'ouvrage et de la connaissance que l'on peut avoir des techniques ou des procédés.

D'un caractère général, il complète et actualise les divers documents existants qui, le plus souvent, ne concernent que quelques aspects particuliers de la conception ou du calcul de certains types d'ouvrages. Il s'adresse aux maîtres d'oeuvre et aux concepteurs qui auront à choisir et à concevoir des ouvrages de soutènement dans le cadre de projets routiers ou autoroutiers. Il s'adresse également aux bureaux d'études et aux entreprises qui pourront y trouver les exigences fondamentales auxquelles les maîtres d'oeuvre attacheront une importance toute particulière dans un domaine encore peu codifié.

■ Guide du projeteur ouvrages d'art

Ponts courants

- Réf. F9850 - Prix : 300 F

Ce guide s'adresse à la fois au projeteur ouvrages d'art et au projeteur routier pour les aider à intégrer le projet d'ouvrage d'art au sein du projet général de l'infrastructure routière. Il se limite aux ponts courants, même si de nombreux aspects sont aisément transposables aux ouvrages d'art non courants.

Le guide aborde en premier lieu les procédures d'instruction des projets, dans le cadre de la circulaire du 5 mai 1994. Puis il passe en revue les différentes données du projet dont le recensement constitue le point de départ des études et se matérialise par le programme de l'ouvrage. Enfin, il fournit des éléments techniques et économiques de choix permettant au projeteur d'adapter sa solution aux contraintes spécifiques du projet.

■ Prévention des pathologies courantes d'ouvrages d'art

Protection contre l'eau

- Réf. F9817 - Prix : 150F

Ce document a l'intention de transmettre aux concepteurs de ponts (bureaux d'études, maîtres d'ouvrages, mais aussi les maîtres d'oeuvre) des conseils destinés à éviter la reproduction d'erreurs compromettant la durabilité de ces ouvrages.

Une meilleure approche des problèmes, permettra de faire, à peu de frais, des économies substantielles d'entretien ; dans ce domaine des détails considérés à tort comme mineurs peuvent avoir des répercussions importantes sur la durabilité des ouvrages.

Dans un premier temps, ces conseils sont ciblés sur les défauts de protection de l'ouvrage contre l'eau, cas les plus courants. Le Setra et le réseau des Laboratoires qui ont produit ce document envisagent de développer d'autres thèmes complémentaires.

■ Construction des ouvrages d'art

Résultats statistiques - Année 1997

- Réf. P2097 - 80 F

Chaque année, une enquête sur l'ensemble des ponts de plus de cinq mètres construits en France durant l'année précédente, est réalisée par le CTOA.

Ainsi, sont donc actuellement recensés auprès des DDE, des Services Techniques Départementaux, des Sociétés Concessionnaires d'Autoroutes et enfin de la SNCF, l'ensemble des ponts dont ces organismes ont assuré la maîtrise d'oeuvre. Ce document concerne les résultats de l'année 97. Il présente l'analyse des résultats de l'exploitation des renseignements communiqués en termes de coût et de dimensions d'ouvrages, selon différents critères (type d'ouvrage, matériau, nature de la brèche et de la voie portée, maîtrise d'ouvrage...). Il donne également des indications sur les types de marchés, l'activité des entreprises et des bureaux d'étude, la répartition géographique des tra-

voux. Les causes de démolition et remplacement d'ouvrages sont également mentionnées. Enfin, des courbes permettent de connaître l'évolution de l'activité ouvrages d'art sur la dernière décennie.

Il se décompose en trois chapitres :

- le 1er se rapporte aux ponts routiers ;
- le 2e concerne les ponts sur autoroutes concédées ;
- le 3e est relatif aux voies SNCF .

■ Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Deuxième partie - Fascicule 03

Auscultation - Surveillance renforcée - Haute surveillance - Mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde

- LCPC - SETRA Réf. F809803 - Prix : 50 F

Ce document est l'un des fascicules dont l'ensemble constitue la deuxième partie de l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art du 19 octobre 1979, cette instruction émanant de la Direction des Routes du MELT.

Ce fascicule présente les démarches qui doivent être suivies lorsqu'à l'issue d'une action de surveillance, l'état de service d'un ouvrage est jugé normal, défectueux ou douteux. Il insiste sur l'objectif premier qui est d'assurer la sécurité, et selon les risques de défaillance de l'ouvrage en fonction du temps, le fascicule oriente le lecteur vers l'une des quatre actions suivantes :

- une auscultation
- ure surveillance renforcée
- une mise sous haute surveillance
- une prise de mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde.

Pour chacune de ces quatre actions, le fascicule expose ensuite les objectifs, les conditions d'application, la consistance des opérations, les moyens et l'organisation à mettre en oeuvre.

À titre de complément d'information, le fascicule 03 présente en annexe un schéma d'aide au processus décisionnel, ainsi qu'une liste des principales méthodes d'auscultation éprouvées et leurs références bibliographiques.

■ Note d'information - N° 23

Équipement des TPC des ouvrages d'art franchissant des zones à environnement sensible

- Avril 1999 - Réf. F 9907 - Gratuit

L'objet de cette note est de définir les dispositions à prévoir, au stade de la conception, dans le terre plein central - TPC - des ouvrages franchissant des zones à environnement sensible - captage des eaux essentiellement - en fonction de la largeur du vide central et de la nature de la zone à franchir. Ces dispositions portent sur la géométrie et les barrières de sécurité ; les dispositions à envisager en matière de récupération des effluents sont traitées par ailleurs.

■ Avis technique - Joints de chaussée - renouvellement

Entrep.	Produit	Date	Validité	Réf.
FREYSSINET INT.	N 50	R 07/98	07/2003	F 8879.59
CIPEC S.A.	WS	R 07/98	07/2003	F 8879.60
CIPEC S.A.	WOSd 50	R 07/98	07/2003	F 8879.61
CIPEC S.A.	Wd 80	R 07/98	07/2003	F 8879.62
PCB	RAN P 300 a 800	R 12/98	12/2003	F 8879.63

■ Avis technique - Étanchéité

Entrep.	Produit	Date	Validité	Réf.
SPAPA	ASPARENE PONT	02/1999	02/2004	F AT ET 99.01

Rappel : le prix de chaque Avis technique est de 20 F.

COMITÉ DE RÉDACTION

SETRA:

MM. Binet, Bouchon, Millan

CETE:

M. Grèzes (Bordeaux)

M. Tavakoli (Lyon)

DDE :

M. Brazillier (DDE 89)

M. Portier (DDE 13)

M. Bouvy (DDE 12)

LCPC :

M. Godart

IGOA :

M. Bois

Coordination :

Jocelyne Jacob (Setra-Ctoa)

Tél. : 01 46 11 32 79

Fax. : 01 46 11 34 74

Jacqueline Thirion (Setra-Ctoa)

Tél. : 01 46 11 34 82

Réalisation :

Barbary & Courte

Tél. 01 44 50 52 55

www.barbary-courte.com

Flashage :

Augustin

Tél. 01 40 36 10 15.

Impression :

Imprimerie de Montligeon

Tél. 01 47 12 11 44.

ISSN :

1266-166X

Audiovisuels

■ Doublement du Viaduc du Canal St Denis - A 86

Cassette vidéo VHS - Durée 10 mn
 • Réf. F 9853 - Prix : 100 F

Dans le cadre des travaux d'élargissement de l'Autoroute A 86, un nouveau viaduc vient doubler au Nord le premier viaduc et permet de franchir le canal Saint-Denis, les voies ferrées Paris-Soisson et le RER B, ainsi que les routes départementales 24, 27 et 30. Cet ouvrage à ossature mixte, long de 768 mètres, comportant 16 travées dont la plus grande de 83 mètres franchit le canal Saint-Denis. Il supporte 4 voies de circulation.

■ Construction de la Passerelle piétonne de Montigny-lès-Cormeilles - A 15

Cassette vidéo VHS - Durée : 13 mn
 • Réf. F 9908 - Prix : 150 F

La passerelle piétonne de Montigny-lès-Cormeilles, près d'Argenteuil, franchit l'autoroute A 15, Paris - Cergy-Pontoise. Elle remplace une passerelle bois, en arc, déposée pour des raisons de sécurité vis-à-vis des usagers. Cette élégante structure de type bow-string, de 55 mètres de portée, est entièrement métallique. Elle s'appuie sur les culées existantes, réaménagées pour s'adapter à cette nouvelle passerelle. L'arc du bow-string et ses tirants sont formés de tubes, ses suspentes de câbles clos, son platelage d'une tôle raidie par des augets et appuyée sur des pièces de pont.

La passerelle a été construite parallèlement à l'autoroute et mise en place à l'aide de deux grues en une nuit seulement, avec coupure de l'A 15.

Logiciels

■ Logiciel CAPT-DCE/OA : Conception assistée des pièces écrites techniques des DCE de ponts courants.

Version d'Avril 1999

• Réf. L47-9904 - Prix : 8 300 F à l'achat + 1 700 F pour chaque nouvelle version

Le logiciel CAPT-DCE/OA permet d'éditer rapidement au format Word 6 ou 7 le CCTP et le bordereau des prix d'un DCE portant sur un ou plusieurs ponts courants, ainsi que son détail estimatif au format Excel 5 ou 7.

La saisie de l'ouvrage à traiter s'effectue par l'intermédiaire d'un questionnaire très précis, sorte de check-list, qui contribue à améliorer la qualité du projet. Les clauses du CCTP et les définitions de prix, qui seront régulièrement mises à jour, s'appuient sur les normes et les fascicules du CCTG en vigueur. Elles peuvent être complétées ou modifiées à volonté. Enfin, des fichiers générés automatiquement permettent des échanges de données avec les logiciels de la ligne Marchés Publics.

La très grande majorité des fondations, appuis, tabliers et superstructures de ponts courants peuvent être traités par CAPT-DCE/OA. Ce logiciel ne couvre par contre pas les travaux de réparation ou de modification de ponts existants. ■

