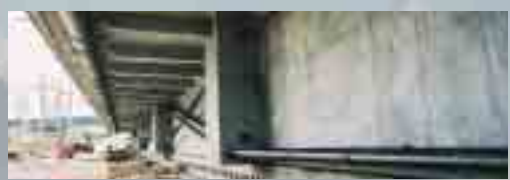


# Ouvrages d'art

---



# SOMMAIRE

Bulletin du Centre  
des Techniques d'Ouvrages d'Art

## OUVRAGES MARQUANTS

### Le nouveau pont de Jonches

FERRY TAVAKOLI

☛ P. 2



## TECHNIQUES PARTICULIÈRES

### La sécurité sur un passage inférieur très court à proximité d'un accès

DOMINIQUE VULIN, MICHEL FRAGNET

☛ P. 11

## RÉGLEMENTATION, CALCULS

### Calcul d'une dalle biaisée à l'Eurocode 1 par couplage du logiciel MRB-EL et du paquetage Trafic

GUILLAUME VEYLON, MICHEL PRAT,  
JEAN GUAL, JEAN-ARMAND CALGARO,  
HUNG HUYNH, PIERRE PEYRAC

☛ P. 17

## INFORMATIONS BRÈVES

### Stages

☛ P. 28

## LE KIOSQUE DU SÉTRA

### Les dernières publications Ouvrages d'Art

☛ P. 30

## ÉDITORIAL

Ce numéro du bulletin ouvrages d'art et son précédent témoignent avec précision et pertinence de la bonne dynamique du Réseau Scientifique et Technique pour satisfaire les besoins de différents maîtres d'ouvrages. Si les grandes lignes de l'innovation ont été jusqu'ici guidées essentiellement par les entreprises et la réussite des chantiers à court terme, ce sont les gestionnaires et les exploitants qui sollicitent aujourd'hui notre expertise et notre créativité.

Evolution des transports exceptionnels, vulnérabilité au séisme par itinéraire, configuration particulière des dispositifs de sécurité, réhabilitation d'ouvrages... les questions ne manquent pas. Malgré la vague générale de standardisation et de normalisation, les réponses sont rarement toutes prêtes. A nous d'imaginer les solutions effectives et proportionnées et de faire partager nos réflexions au-delà de notre domaine.

Hélène Abel  
Chef du Centre des Techniques  
d'Ouvrages d'Art

Directeur de la publication : Jean-Claude Pauc. Comité de rédaction : Hélène Abel-Michel, Emmanuel Bouchon, Angel-Luis Millan (Sétra). Pierre Paillusseau (CETE du Sud-Ouest), Ferry Tavakoli (CETE de Lyon), Jean-Christophe Carles (Cete Méditerranée), Michel Boileau (DDE 31), Bruno Godart (LCPC), Claude Bois (Misoa). Rédacteur en chef : Jocelyne Jacob (Sétra-Ctoa). Tél : 01 46 11 32 79 / Fax : 01 46 11 34 74. Coordination : Jacqueline Thirion (Sétra-Scac). Tél : 01 46 11 34 82. Réalisation : ICI design. Tél : 01 43 36 15 52. Impression : Caractère, 2, rue Monge - BP 224-15002 Aurillac CEDEX ISSN : 1266-166X - © Sétra - 2003

# Le nouveau pont de Jonches

FERRY TAVAKOLI

## Introduction

Dans le cadre de la mise à 2 x 2 voies de la RN 6 entre Appoigny et Auxerre il est nécessaire de doubler l'ouvrage de franchissement de l'Yonne réalisé dans les années 1980-1982.

L'ouvrage existant comporte 3 travées de 40,50 – 50,00

*Ouvrage existant*

et 40,50 m de portées. Il franchit l'Yonne avec un biais de 84 grades, une voie communale en rive gauche et une voie locale en rive droite. Le tablier a 10,40 m de largeur.

Le tracé en plan est un alignement droit et le profil en long est constitué d'une pente de 0,68 % de la rive gauche vers la rive droite.

Le tablier, en béton B35, est constitué de 2 nervures de 2,65 m de hauteur et de 1,20 m de largeur recevant un hourdis de 0,25 m d'épaisseur. Les poutres sont précontraintes par des câbles 12 T 15 intérieurs au béton. Les deux piles en rivière sont fondées sur des massifs de béton immergé. Les culées sont fondées superficiellement. Le tablier a été réalisé sur cintre.

Le nouvel ouvrage a les mêmes portées mais sa largeur est de 13,25 m en raison de la présence d'un passage pour piétons et cyclistes.

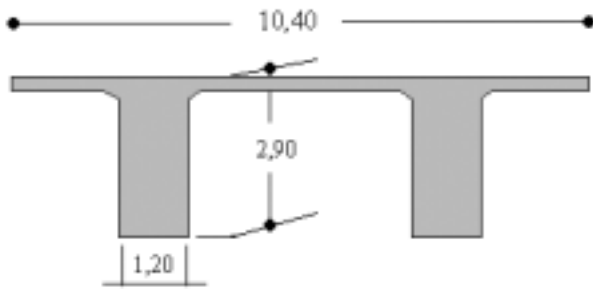
## Études préliminaires – Choix de la solution

Les études préliminaires ont été réalisées en 1998. La conception du nouvel ouvrage devait prendre en compte plusieurs contraintes.

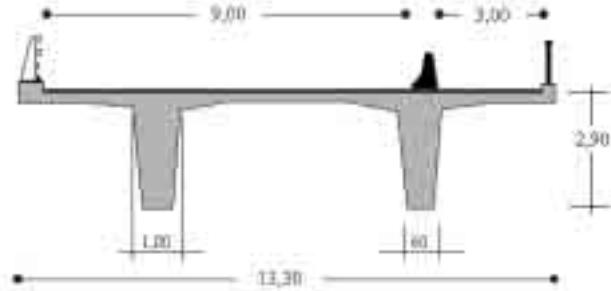
- La première contrainte était liée à la présence de l'ouvrage existant. Le nouveau tablier devait avoir les mêmes portées et la même hauteur et être en harmonie avec le tablier existant.
- A la demande des services de navigation les piles et les palées provisoires situées dans l'Yonne devaient être dimensionnées aux chocs de bateaux de 10 MN.
- L'ouvrage devait supporter les convois exceptionnels de type E tels que définis dans la circulaire du 20 juillet 1983.

La prise en compte des chocs de bateaux sur les palées provisoires a conduit à écarter le doublement à l'identique





Coupe schématique du tablier existant



Coupe schématique de la solution binervure en BHP

pour lequel le tablier était réalisé sur cintre. Le coût du cintre aurait été prohibitif et aurait rendu cette solution trop coûteuse. Il a fallu envisager des solutions pouvant être réalisées sans cintre en rivière c'est à dire soit par poussage, soit par encorbellement.

Quatre solutions ont été étudiées :

- un tablier binervure en BHP inspiré du pont de Joigny, constitué de deux nervures de 0,80 m d'épaisseur moyenne (0,60 m d'épaisseur à la base et 1,00 m d'épaisseur en partie supérieure) surmontées d'un hourdis en béton armé de 0,30 m d'épaisseur moyenne. Le tablier était précontraint, longitudinalement, par des câbles entièrement extérieurs au béton. Il était mis en place par poussage. Cette solution était celle qui s'intégrait le mieux par rapport à l'ouvrage existant.
- un tablier monocaïsson en béton précontraint qui présentait comme avantage une facilité de réalisation (par poussage ou par encorbellement) et qui était, sur le plan esthétique, assez proche du tablier actuel.
- un tablier bipoutre à entretoises, avec un contraste

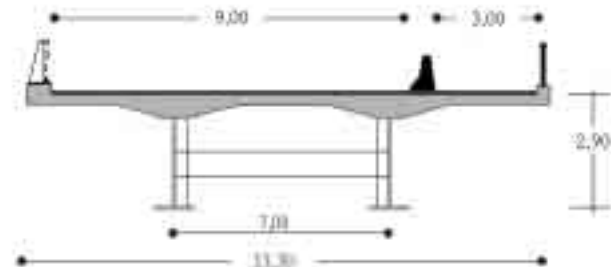
important avec l'ouvrage existant, dont les seuls intérêts résidaient dans son coût peu élevé et la facilité de réalisation.

- une variante bipoutre a également été étudiée. Dans cette solution la dalle de couverture supportait uniquement la chaussée. Il était prévu des consoles dans le prolongement des entretoises permettant la réalisation d'une petite dalle portant la bande cyclable et le passage pour piétons. Cette solution ne présentait pas d'intérêt par rapport à la solution mixte classique. La tête des piétons était située vers la lisse de la BN1 ce qui était un inconvénient. Cette solution ne doit pas être retenue dans le cas d'un ouvrage neuf.

D'un point de vue économique l'ouvrage mixte s'avérait le plus compétitif. Les ouvrages en béton précontraint étaient d'un coût supérieur d'environ 15%. Sur le plan esthétique le doublement d'un tablier en béton par un tablier mixte a été jugé difficilement acceptable en site urbain. C'est la solution tablier binervure qui s'accordait le moins mal avec l'existant.

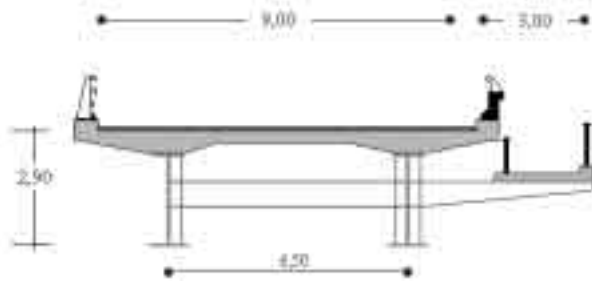


Coupe schématique de la solution monocaïsson

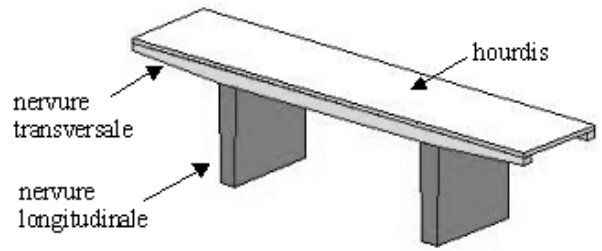


Coupe schématique de la solution bipoutre





Variante bipoutre avec piste cyclable décalée



Perspective du tablier

Finalement c'est cette dernière solution qui a été retenue à l'issue de l'EPOA, après avis de l'IGOA et du Sétra, pour les études de projet.

## Projet d'ouvrage d'art

### Optimisation de la solution

Les premiers calculs de la solution binervure ont montré que le poussage posait quelques problèmes et qu'il était souhaitable de réduire le poids propre du tablier afin de faciliter cette opération. Il a été décidé d'alléger le hourdis dont l'épaisseur moyenne était de 0,30 m en le remplaçant par un hourdis mince nervuré avec une épaisseur moyenne de 0,20 m. Les épaisseurs des nervures ont également été optimisées. Dans un premier temps l'épaisseur moyenne des nervures a été réduite de 0,80 à 0,70 m. Par la suite il y a eu une seconde optimisation avec une épaisseur moyenne de 0,55 m (0,50 m à la base et 0,60 m en partie supérieure).

Le tablier, en béton à hautes performances (B80), comporte deux poutres trapézoïdales dont l'épaisseur varie de

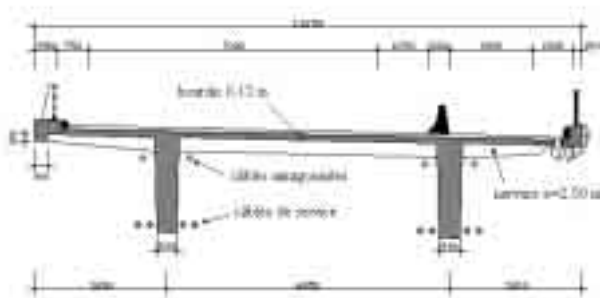
0,50 m à la base à 0,60 m à l'encastrement dans le hourdis. Ces poutres portent un hourdis mince (15 cm d'épaisseur entre nervures) raidi par des nervures transversales espacées de 2,50 m. Les nervures ont 0,40 m de hauteur et 0,30 m d'épaisseur. Une longrine en béton armé raidit le bord du tablier facilitant l'ancrage des montants de BN4. La hauteur totale du tablier est de 2,85 m.

### Précontrainte – conception du câblage

Longitudinalement le tablier est précontraint par 8 câbles extérieurs 27T15S, de classe 1860 MPa (4 par poutre). Ils sont placés, par paires, de part et d'autre des poutres et au plus près des âmes afin de faciliter la diffusion de la précontrainte aux abouts. Les câbles sont injectés à la cire pétrolière.

Les câbles sont déviés au droit des entretoises sur appuis et des déviateurs situés en travées. Chaque travée de rive comporte un déviateur situé à 18 m de la culée. La travée centrale comporte 2 déviateurs situés à 15 m des piles. Les câbles sont ancrés aux 2 extrémités du tablier au voisinage du centre de gravité de la section.

Les dispositions permettant de mettre en œuvre quatre



Coupe transversale courante

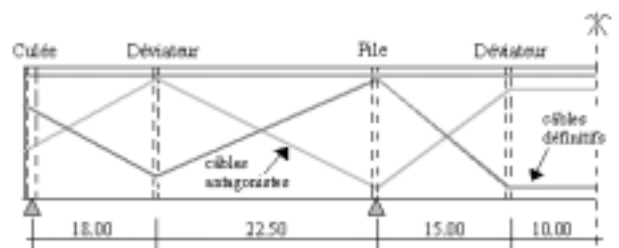


Schéma de câblage

câbles de précontrainte additionnelle sont prévues au niveau des entretoises et des déviateurs.

Dans le sens transversal 2 solutions ont été étudiées. Une solution avec des nervures en béton armé et une seconde solution avec précontrainte transversale à l'intérieur des nervures. Finalement c'est la solution en béton armé qui a été retenue pour des raisons économiques.

### **Cinématique de construction du tablier**

Le mode de réalisation du tablier était le suivant :

- bétonnage du tablier sur la plateforme située en rive droite de l'Yonne ;
- mise en place de la précontrainte de poussage constituée

de 4 câbles 27 T 15 S par nervure : 2 câbles définitifs et 2 câbles antagonistes ;

- mise en place d'un avant bec de 35 m fixé à l'avant du tablier ;
- poussage du tablier en une seule phase ;
- démontage de l'avant bec et des câbles antagonistes ;
- réalisation des superstructures ;
- mise en place de 2 câbles définitifs par nervure (câbles antagonistes réutilisés).

Les câbles antagonistes étaient tendus à 0,70 Fprg et comportaient des sur-longueurs de manière à pouvoir être réutilisés comme câbles définitifs. Leur tracé avait pour effet de compenser au mieux l'excentricité des



*Vue du tablier avant poussage  
Au premier plan : déviateur de la travée centrale*

câbles définitifs de manière à obtenir une compression à peu près uniforme dans la section lors du poussage.

Les études de poussage ont été effectuées à l'aide du programme du ST1 du Sétra avec un avant-bec de 35 m de longueur. Elles ont pris en compte le gradient thermique et une densité de 26 KN/m<sup>3</sup> pour le béton B80.

Les contraintes extrêmes ont été obtenues en phase de poussage lors du franchissement de travée médiane :

- En fibre supérieure :

$$\sigma_{\max} = 12,8 \text{ MPa}, \quad \sigma_{\min} = -5,7 \text{ MPa}$$

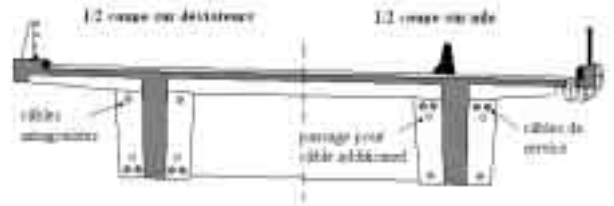
- En fibre inférieure :

$$\sigma_{\max} = 38,3 \text{ MPa}, \quad \sigma_{\min} = -1,5 \text{ MPa}$$

Les contraintes limites pour le béton B80 sont de 46,4 MPa en compression et -6,05 MPa en traction. Elles sont calculées à l'aide de l'article 4.10 du BPEL 99 en prenant  $f_{c28} = 80 \text{ MPa}$  ;  $f_{t28} = 5,10 \text{ MPa}$  et le coefficient  $k=0,2$ .

### Entretoises et déviateurs

Les déviateurs en travée et les entretoises sur piles ont été dimensionnés de façon à optimiser leur poids. Ils sont constitués de deux raidisseurs situés de part et



Coupe sur déviateur

d'autre de chaque poutre et d'un voile central de 0,50 m d'épaisseur. Les raidisseurs ont 0,60 m d'épaisseur. Leur longueur est de 1,00 m pour les déviateurs et 1,50 m pour les entretoises sur piles. La liaison entre raidisseurs et poutres est assurée par des armatures de béton armé.

Au droit des culées les câbles sont ancrés dans des bossages de 3 m de longueur situés au droit de chaque nervure. Chaque bossage est conçu pour recevoir 8 câbles 27 T 15 : 4 câbles de service, 2 câbles antagonistes et 2 câbles additionnels. La liaison avec les poutres est réalisée au moyen de 20 barres de précontrainte Maccaloy de 50 mm de diamètre.



Ancrage des câbles sur culées



## Résistance au feu

Le tablier franchit 2 chemins sous les travées de rive. L'incendie d'un véhicule sous le tablier peut provoquer un échauffement des câbles de précontrainte et une dégradation importante de leurs caractéristiques physiques (module d'Young, limite d'élasticité, perte de tension due à l'allongement thermique).

Une réflexion a été menée afin d'apprécier les conséquences d'un tel accident et de proposer des mesures de protection.

Une vérification à l'État Limite Ultime Accidentel a été effectuée en supposant la précontrainte rompue à 50% (rupture de la moitié des câbles ou une réduction équivalente de leurs caractéristiques). La résistance était assurée pour 70% des charges civiles.

La protection des câbles dans les zones concernées (20 m sous chaque travée de rive) a été chiffrée à 120000 € H.T. environ. Elle était constituée d'un isolant type Kerlane 50 de 25 mm d'épaisseur et d'une gaine en aluminium de 4 mm d'épaisseur. Cette protection permettait de limiter à 120° la température du câble pour une température extérieure de 925° au bout d'une heure.

Compte tenu des résultats des calculs et du coût élevé des protections il a été décidé de ne pas protéger les câbles contre l'incendie.

## Appuis et fondations

Les appuis sont également réalisés en béton B80 pour des raisons d'homogénéité de parements et de durabilité.

Les culées sont constituées d'un sommier reposant sur cinq pieux de 1,0 m de diamètre répartis sur deux files. Le mur garde-grève est éloigné du tablier afin de pouvoir disposer d'une chambre de tirage permettant d'intervenir sur la précontrainte si cela est nécessaire ultérieurement.

Les piles sont fondées sur des massifs de béton immergé ancrés dans le calcaire.

## Contraintes de navigation

L'Yonne est une voie navigable de classe III. Le gabarit de navigation à dégager correspond à un chenal de 39 m de largeur, avec une hauteur libre de 4,40 m au-dessus de la retenue normale. Durant les travaux ce gabarit peut être réduit.

Les piles devront résister au choc de bateaux. La définition de l'intensité des charges statiques à prendre en compte au niveau des P.H.E.N. pour simuler l'effet de la collision a donné lieu à de nombreuses discussions entre les services de la DDE, de la navigation et du CETMEF. Finalement les valeurs retenues pour les chocs de bateaux sont celles proposées par le CETMEF soit 120 tonnes pour le choc frontal et 24 tonnes pour le choc latéral (valeurs proposées par le BAEL pour les voies à petit gabarit). L'ouvrage existant avait été calculé pour des chocs respectifs de 100 et 20 tonnes.

## Intérêts du BHP

En dehors des qualités intrinsèques du BHP et en particulier sa durabilité, son utilisation a permis de réduire sensiblement le poids mort du tablier et par voie de conséquence la quantité de précontrainte mise en œuvre.

L'épaisseur de la dalle de couverture, de l'ordre de 30 cm pour une solution classique, est passée à 20 cm pour le hourdis nervuré du nouvel ouvrage.

La réduction de l'épaisseur des nervures et du hourdis a conduit à une épaisseur équivalente de 52 cm contre 58 cm pour le pont de Joigny et 82 cm pour l'ouvrage existant. Le tableau suivant résume la comparaison entre les 2 ponts de Jonches et le pont de Joigny :

Tablier	Jonches 2 <sup>ème</sup> génération	Jonches 1 <sup>ère</sup> génération (*)	Pont de JOIGNY (*)
Date de réalisation	2002	1982	1988
Béton utilisé	B 80	B 35	B 60
Portées (m)	40,5 – 50 – 40,5	40,5 – 50 – 40,5	34 – 46 - 34
Épaisseur des nervures (m)	0,55	1,20	0,65
Ep. moyenne du hourdis (m)	0,20	0,30	0,30
Épaisseur équivalente (m)	0,52	0,82	0,58
Volume de béton (m3)	900	1430	1000
Précontrainte longitudinale	8 câbles 27 T 15S	36 câbles 12 T 15	13 câbles 27 T 15S
Aciers de précontrainte (t)	34	57	55
Aciers passifs (t)	156	178	163

(\*) Les quantités correspondent à un tablier de 13,25 m de largeur.





## Déroulement des travaux

### Réalisation du tablier

Les travaux ont été réalisés entre juillet 2001 et septembre 2002. Les dispositions techniques prévues au projet ont été reprises presque intégralement. La seule modification a concerné les câbles antagonistes. Les entreprises n'ont pas souhaité réutiliser ces câbles après poussage comme câbles définitifs. Les dispositions techniques et de protection nécessaires à mettre en œuvre en vue de la réutilisation des câbles ont été jugées trop onéreuses.

Le tablier a été exécuté selon le phasage suivant :

- préfabrication des nervures transversales, en béton armé, sur le site,
- exécution des nervures principales, sur des longrines

en béton armé, en 7 plots. Chaque plot correspond à la partie située entre 2 déviateurs ou entretoises,

- réalisation des entretoises et déviateurs,
- réalisation du hourdis en 7 phases.

La formulation du béton B80 était celle déjà utilisée pour la réalisation de deux tabliers de la déviation de Sens en 1999 :

- ciment CPA CEM I 52.5 : 420 kg/m<sup>3</sup>,
- fumée de silice : 35 kg/m<sup>3</sup>,
- superplastifiant : 1,73 %,
- sablon 0/1 : 140 kg/m<sup>3</sup>,
- sable 0/4 : 660 kg/m<sup>3</sup>,
- gravillons 6/10 : 250 kg/m<sup>3</sup>,
- gravillons 10/14 : 730 kg/m<sup>3</sup>,
- eau : 152 l/m<sup>3</sup> (E/C = 0,36).



*Préfabrication des nervures transversales*



*Liaison tablier avant-bec après renforcement de la pièce d'ancrage des câbles de poussage*

Les critères d'acceptation du béton étaient les suivants :

- temps de mise en oeuvre ne dépassant pas 1h30 après fabrication,
- taux d'air occlus inférieur à 2,2 %,
- étalement compris entre 35 et 60 cm.

Les résistances moyennes obtenues, à 28 jours, lors des contrôles ont été de 100 MPa en compression et 6,5 MPa en traction.

Le poussage a été réalisé avec un avant-bec de 35 m comme prévu au projet. Le tablier a été vériné afin de mettre en place les appuis de poussage constitués de plaques de téflon. Tous les câbles ont été mis en place avant poussage : 4 câbles définitifs par nervure tendus à la moitié de la tension définitive et 2 câbles antagonistes par nervure.

Le poussage s'est effectué avec une vitesse maximale de 3 m/h à l'aide de 2 vérins de 200 tonnes de force utile prenant appui sur les longrines de poussage.

### Problèmes rencontrés

#### Liaison tablier avant-bec

En raison de la faible épaisseur des nervures, la liaison entre le tablier et l'avant-bec a été assurée par des barres de

précontrainte et les câbles antagonistes. Ces derniers étaient ancrés sur une tôle insuffisamment raidie qui a subi une forte déformation à la mise en tension des câbles. Il a été nécessaire de remplacer les câbles et de renforcer les pièces d'ancrage.

#### Longrines de poussage

Des désordres sont apparus dans les longrines en phases de poussage : fissuration et décollement de la plaque en acier. Ils étaient principalement dus à la qualité médiocre du sol de fondation. Ils ont conduit l'entreprise à effectuer quelques vérinages intermédiaires et ont augmenté la durée du poussage.

#### Fissuration du hourdis mince

Il est apparu dans certaines zones du hourdis une fissuration assez importante. Ces fissures, de faible ouverture, sont apparues très rapidement (après quelques jours) et peuvent être expliquées par une prise très rapide et une forte vibration liée à la présence d'air occlus. Elles peuvent être également dues au retrait gêné du hourdis.

#### Problèmes liés au béton

Les problèmes rencontrés étaient les suivants :

- fortes poussées sur les coffrages dues à la fluidité du béton qui ont conduit à renforcer les coffrages des piles.



Cette fluidité a également provoqué de petits défauts de planéité du hourdis et des fuites de laitance dans les angles de coffrages,

- importante viscosité rendant le talochage très difficile et l'utilisation de la règle vibrante indispensable,
- fortes chaleurs dégagées lors de la prise dans les pièces massives malgré l'utilisation d'un ciment à faible chaleur d'hydratation. La température a atteint 72° dans une des piles.
- important taux d'air occlus rendant nécessaire une forte vibration,
- apparition d'efflorescences blanchâtres sur les parements. Ces traces sont apparues sur les pièces soumises à la pluie.

**Principaux intervenants :**

Maîtrise d'œuvre : DDE de l'Yonne

Conception : CETE de Lyon – DOA

Architecte : B. Mikaelian

Entreprises : SNCTP – Freyssinet – Bauland

Études d'exécution : BEA – COGECI – ETP

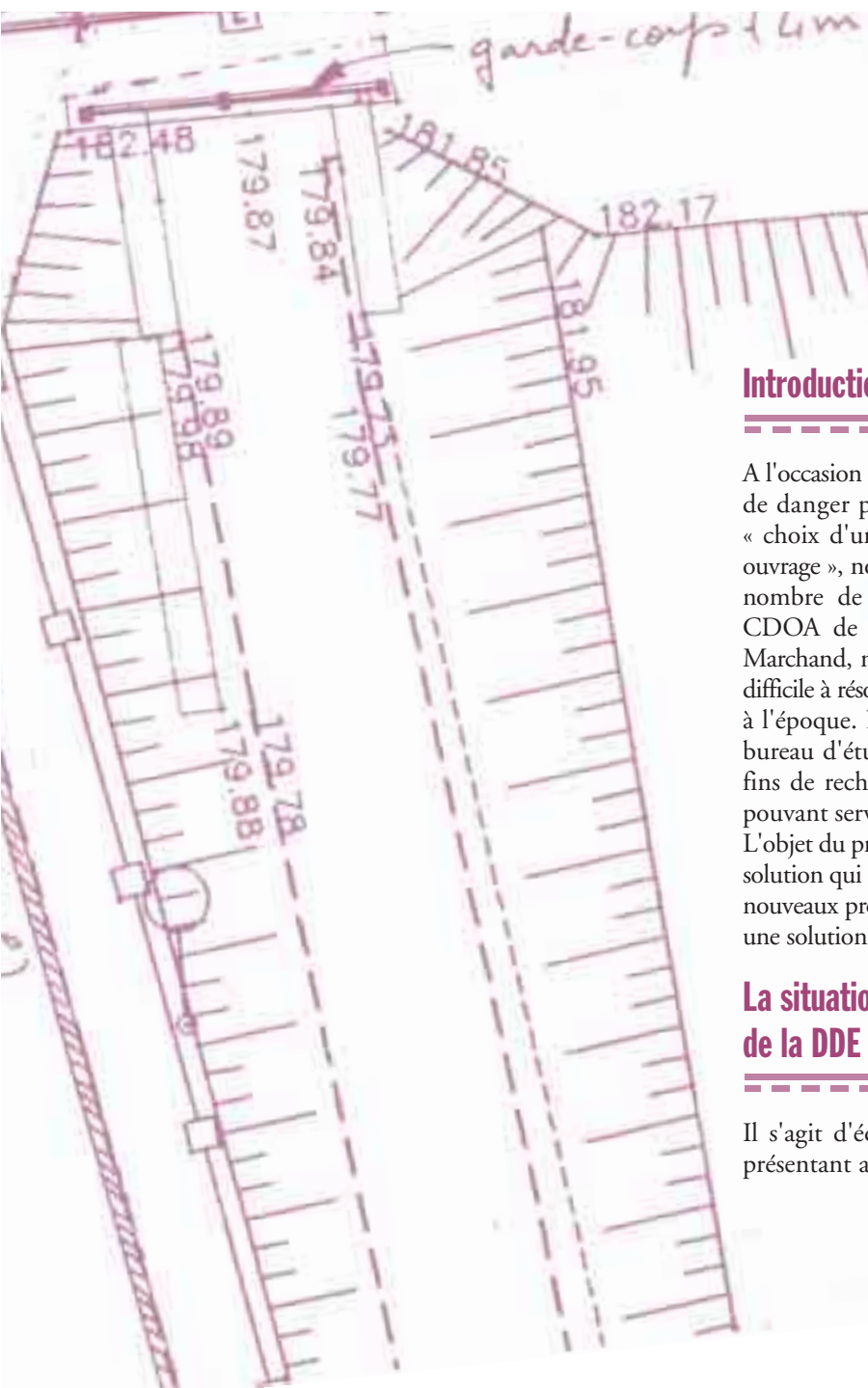
Contrôles : CETE de Lyon (DOA et LRA) – SERALP – DDE ■



# La sécurité sur un passage inférieur très court à proximité d'un accès

DOMINIQUE VULIN, MICHEL FRAGNET

## Utilisation d'un nouveau dispositif d'extrémité



### Introduction

A l'occasion de la mise au point de la méthode de l'indice de danger présentée dans le fascicule du guide GC : « choix d'un dispositif de retenue en bord libre d'un ouvrage », nous avons été amenés à rencontrer un certain nombre de CDOA. Lors de nos entretiens avec la CDOA de Saône et Loire, la responsable, Madame Marchand, nous a soumis un cas de figure qui paraissait difficile à résoudre avec les solutions techniques disponibles à l'époque. Nous avons donc lancé une étude avec un bureau d'étude spécialisé en dispositifs de retenue aux fins de rechercher une solution adaptée à ce cas mais pouvant servir d'exemple pour des situations similaires. L'objet du présent article est de présenter le problème et la solution qui a été proposée. On notera que l'apparition de nouveaux produits tel que les « terminaux » a pu apporter une solution élégante et efficace au problème posé.

### La situation existante sur l'ouvrage de la DDE 71

Il s'agit d'équiper en dispositifs de retenue une zone présentant au moins les deux particularités suivantes :



Figure 1 : élévation (vue du PI et chemin d'accès avec la RN6)



Figure 2 : vue de détail de l'aménagement actuel

- la présence d'un passage inférieur court justifiant le besoin en dispositif de retenue (pour les piétons, les bestiaux, voire un chemin rural ...),
- la proximité immédiate d'une voie d'accès à la voie principale.

Le cas concret consiste en un passage inférieur d'une largeur utile de 2,40 m sous la RN6 à Uchizy permettant le passage de véhicule léger du fait du gabarit réduit (2.5 m). Le bord du tablier se situe à 2 m du bord de la chaussée de la N6. Ce côté présente le problème le plus délicat compte tenu de cette distance et des risques de sortie de chaussée à droite en direction de Tournus et de la présence de l'accès (voir figures 1, 2, et 3). La circulation sur ce petit chemin rural est très faible.

On peut supposer qu'il permet la traversée d'utilisateurs comme les piétons, les cyclistes, les bestiaux,...etc. Ce passage inférieur permet la traversée de la RN6 en sécurité, notamment pour les activités rurales. Il y a donc un accès immédiat juste en bordure du passage inférieur.

- une barrière type GS2 implantée en bordure de la N6 et qui se poursuit en tournant (glissière cintrée) en bordure du chemin sur environ 20 m. A noter que d'autres franchissements sur cet axe comportaient un aménagement réduit à sa plus simple expression (figure 3) ;
- un « garde-corps » constitué de plots en béton (section 0,40 m x 0,40 m) et d'une lisse en tube de diamètre 60 mm situé à environ 60 cm du sol.

## Les contraintes

On recense les contraintes suivantes (sans ordre de priorité) :

- maintien des accès,

- maintien de la visibilité en sortie de chemin,
- sécurité des piétons,
- sécurité des véhicules légers sur la RN6,
- distance bord de RN6 / bord du tablier égale à 2 m,
- distance culée PI / bord du chemin rural égale à 3 m

## Les lacunes de la situation existante

Sans vouloir faire le procès de l'aménagement existant dont on peut penser que ses auteurs ont fait au mieux avec ce dont ils disposaient, on peut relever les points suivants :

- Le garde-corps n'est pas conforme :
  - il serait plus proche d'un garde-corps de service selon la norme XP P 98.405, ce qui ne peut être considéré comme satisfaisant car nous sommes sur une voirie nationale sur laquelle les piétons ne sont pas interdits même s'ils sont extrêmement rares,
  - il présente une agressivité par ses plots à l'encontre des heurts par des véhicules légers.
- La barrière GS présente deux non-conformités principales :
  - la distance d'implantation par rapport au garde-corps, et notamment les plots béton, est insuffisante (0,40m),
  - la longueur d'ancrage côté chemin rural est aussi insuffisante (20m).

Cette situation engendre les risques suivants :

### a) Vis-à-vis des piétons

Bien que la circulation des piétons ne soit pas interdite sur la RN6, celle-ci est réellement très faible. De plus, il est assez peu probable qu'un piéton circulant sur le



Figure 3 : vue d'un autre franchissement sans barrière

bord de la RN6 chemine derrière la barrière GS et donc en bord du tablier de l'ouvrage. La mise en place d'un garde-corps de service conforme (série "I" par exemple) pourrait suffire d'un strict point de vue sécurité mais la route n'étant pas interdite au piéton, les règles imposent la mise en place d'un garde-corps routier conforme à la norme XP P 98.405. De plus, les plots béton (de grosse section) représentent un obstacle agressif.

#### b) Vis-à-vis des véhicules légers circulant sur la RN6

Le véritable risque se situe là : nous sommes en présence d'une dénivellation brutale de 3 m environ ; de plus, l'accès augmente le risque de sortie de chaussée. Un dispositif de retenue de niveau N semble s'imposer. En contrepartie, la mise en place d'un dispositif de retenue de niveau H (pour poids lourds) n'est pas nécessaire (hauteur de chute inférieure à 10 mètres et risque pour les tiers quasiment nul).

## L'aménagement proposé

### Généralités

On peut noter que les dispositions mises en place actuellement sont, dans leur esprit, correctes : garde-corps plus dispositif de retenue de niveau N2.

Les non-conformités sur le garde-corps et la longueur d'ancrage de la barrière GS peuvent, à notre avis, être résolues assez facilement.

Le vrai problème provient des distances de fonctionnement nécessaires. On voit bien que le risque le plus probable se situe au niveau d'un impact dans la partie cintrée (voir figure 1). Dans ce cas là, la barrière GS

cintrée fonctionnera à peu près comme un musoir de rayon  $R > 2$  mètres et la zone d'isolement se situe alors entre 12 et 16 mètres (voir NF P 98.414) donc bien au-delà de l'obstacle que l'on souhaite isoler.

En terme de dispositifs de retenue, on pourrait envisager un dispositif de type atténuateur mais cela s'avère délicat pour les raisons suivantes :

- la place disponible est très limitée ce qui permet au mieux un dispositif de petite capacité (60 km/h) et resterait à vérifier dans le détail,
- celui-ci ne protégerait pas les sorties de chaussée en amont du PI,
- coût élevé.

Cette solution ne paraît donc pas adaptée.

Une solution de type GBA ne peut pas non plus être mise en œuvre correctement compte tenu de la place disponible.

Pour mettre en place un dispositif de façon correcte il conviendrait de déplacer le chemin d'accès de l'autre côté du PI. Mais cela conduit à des travaux lourds fort probablement disproportionnés par rapport à l'enjeu et nécessiterait l'acquisition de terrain.

### Sécurité des usagers piétons

Il s'agit de :

- scier les plots en béton armé,
- mettre en place un garde-corps routier conforme à la norme XP P 98.405 mais léger :
  - préférer des lisses horizontales ;
  - dimensionner le garde-corps sur la base d'une hypothèse d'effort de 125 daN/m (ce qui correspond à une largeur de trottoir inférieure à 1,5 m).



Figure 4 : vue générale d'un terminal

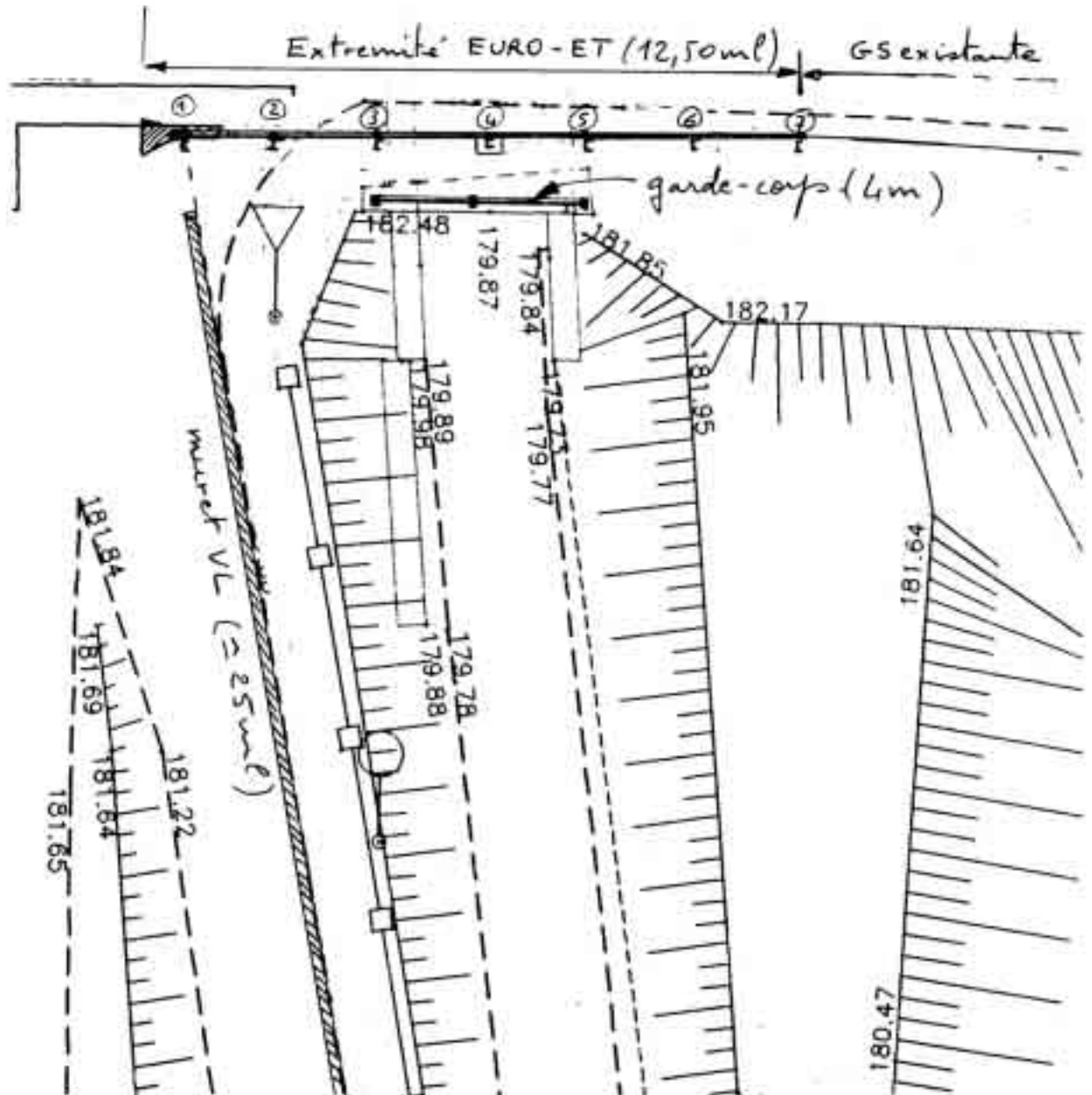


Figure 5 : vue en plan de l'aménagement

Ceci présente l'intérêt de mettre en place un garde-corps conforme mais peu agressif pour les véhicules légers.

### Sécurité des usagers VL

Dans l'impossibilité de trouver un autre dispositif que la barrière GS, nous nous sommes orientés vers une mise en conformité en scindant le problème : traiter d'une part le risque sur la RN par un dispositif approprié, et d'autre part le risque sur le chemin d'accès par un autre dispositif .

Sur la RN, le niveau de sécurité exige au moins un dispositif de retenue routier de niveau N2 conforme : ceci est maintenant possible en installant un nouveau dispositif d'origine dénommé « terminal ou extrémité » conforme à la nouvelle norme NF ENV 1317-4 . Leur apparition sur le marché français est encore récente puisque certains produits sont encore en cours d'homologation mais ils sont déjà largement utilisés dans d'autres pays européens. Ils résultent de la parution de la nouvelle norme EN citée ci-dessus et de la mise en place d'essais de validation définie dans cette nouvelle norme.





Figure 6 : codification d'un aménagement

Ce type de dispositif<sup>1</sup> présente plusieurs avantages :

- efficacité pratiquement dès l'extrémité de la barrière GS en cas de choc latéral,
- efficacité en cas de choc frontal, tout en éliminant le risque constitué par le danger des extrémités des barrières GS,
- largeur de fonctionnement assez réduite (< 1,30m),
- supports espacés tous les 2 mètres.

Leur principe de fonctionnement est variable selon les techniques. Dans le cas du dispositif présenté sur la figure 4, l'élément de glissement passe dans une fente plus étroite que l'élément de glissement ce qui l'oblige à passer comme dans une filière en absorbant de l'énergie. Il me semble plus important de faire ressortir les avantages que de décrire le principe de fonctionnement qui est variable d'un dispositif à l'autre.

Dans le cas présent, sa mise en place est possible moyennant une petite adaptation sur le poteau sur l'ouvrage, qui doit donc être prévu sur platine d'ancrage (comme toutes les barrières GS sur ouvrage) au lieu d'être un support battu dans le sol.

Sur le chemin d'accès, nous avons proposé de mettre en place un dispositif en béton MVL qui donne pleinement son efficacité dès qu'il atteint sa hauteur (soit à environ 80 cm de son extrémité). Cela supprime la sujétion liée à la longueur d'ancrage des barrières GS. Son niveau de retenue (niveau N1) est compatible avec la classification du chemin qu'il borde. Néanmoins, un impact juste derrière le nez du terminal restera un point faible mais probabilité d'un impact juste à ce point là semble très minime.

Voir les figures 4 et 5.

(1) Dans le cas présent, nous avons proposé le procédé dénommé EURO-ET, qui paraissait bien adapté à notre situation mais d'autres dispositifs sont envisageables.

## Généralisation

Le cas traité semble particulièrement contraignant et une démarche de ce type doit pouvoir être entreprise sur des cas similaires. Celle-ci peut se résumer ainsi :

- recenser les risques et définir le niveau de sécurité voulu,
- vérifier si les dispositifs en place répondent au niveau de sécurité défini,
- vérifier la conformité des dispositifs,
- recenser les contraintes locales d'implantation (ouvrage et place disponible notamment).

Plusieurs cas peuvent se présenter :

- **d > 28 mètres** : on est dans une situation « classique » traitée notamment dans le Guide GC, fascicule « Barrières pour la retenue des VL. Barrières de niveau N en accotement » chapitre 4A.
- **28 > d > 20 mètres** : on reste dans le cas où l'emploi d'une barrière rigide en béton de type GBA reste normalement possible.
- **20 mètres > d > 12,50 mètres** : la solution proposée dans cet article est applicable et le dispositif extrémité de file (« Terminal » conforme à la norme ENV 1317-4) peut s'implanter totalement en amont du PI sans modification. On vérifiera que les produits de même type disponibles sur le marché sont bien adaptés : ils empiètent plus sur l'ouvrage mais ils pourraient convenir aussi dans certains cas.
- **d < 12,50 mètres** : c'est le cas présenté dans l'article. Il faut toutefois vérifier que la distance entre le dispositif et le garde-corps soit compatible avec la largeur de fonctionnement du dispositif.



Remarque : la solution " extrémité de file " peut être mise en œuvre dans les deux premiers cas et présente des intérêts en terme de performance de sécurité en cas de choc sur l'extrémité.

## Conclusion

---

Cette configuration comportant un passage inférieur avec une entrée de service ou un accès à quelques mètres de celui-ci est très courante. Les aménagements avec les dispositifs de retenue classiques ne permettaient pas une mise en sécurité satisfaisante de cette zone et les aménagements mis en place ne sont pas exempts de lacunes. Or, il s'agit souvent d'un point que l'on peut qualifier à risques et, de ce fait, il mériterait, au contraire un traitement amélioré.

L'apparition sur le marché des produits dénommés « terminaux ou extrémités », dont la mise au point est la conséquence de la publication d'une nouvelle norme européenne (NF ENV 1317.4), devrait permettre de mieux traiter ces zones et améliorer la sécurité tout en restant d'un coût équivalent à une solution imparfaite.

Une estimation sommaire de l'aménagement proposé conduit à un coût estimé de l'ordre de : 7800 € HT. A mettre en parallèle avec le coût d'un accident avec un blessé léger : environ 13300 €.

Il convient aussi de souligner l'importance d'une bonne coopération entre les services d'exploitation des routes et ceux en charge de la gestion des ouvrages.

Les auteurs de l'article tiennent à remercier la DDE 71 et plus particulièrement Madame Marchand, responsable de la CDOA, auprès de qui nous avons toujours trouvé disponibilité et bon accueil. Sans elle ce travail n'aurait pu être effectué ■

# Calcul d'une dalle biaisée à l'Eurocode 1

par couplage du logiciel MRB-EL et du paquetage TRAFIC

GUILLAUME VEYLON, MICHEL PRAT, JEAN GUAL, JEAN-ARMAND CALGARO, HUNG HUYNH, PIERRE PEYRAC

## Présentation de l'étude

Cet article a pour objectif de présenter les récents travaux engagés par le CTOA du Sétra dans le cadre de la rédaction de l'Annexe Nationale relative à l'Eurocode EN 1991-2 : Charges de trafic sur les ponts. Des études, initiées par la Mission Recherche et Réglementation (M.R.R.), complémentaires à celles qui ont servi à établir l'Eurocode, ont été entreprises et ont porté sur le calcul des effets extrêmes des nouvelles charges de trafic routier sur les plaques biaisées et courbes en béton. Ce sont ces résultats que nous proposons ici, ainsi que leur validation et les comparaisons aux valeurs de dimensionnement obtenues à partir du Fascicule 61, Titre II.

### Rappel sur l'Eurocode 1

L'élaboration et la *calibration* des modèles de charges de trafic routier de l'Eurocode EN 1991-2 (réalisées au Setra) résultaient d'un long travail qui avait permis de finaliser l'ENV 1991-3 et le Document d'Application Nationale (DAN) correspondant. Ce travail avait consisté notamment à trouver les paramètres d'un modèle de charges qui étaient en mesure de donner des résultats homogènes, indépendants des hypothèses de calcul des structures et des matériaux (Mindlin, Kirchhoff), des types d'analyse (linéaire, non linéaire, dynamique), des caractéristiques mécaniques (lois de comportement ou de fonctionnement diverses) et géométriques (portées, largeurs, etc.), des types de pont

(sections, conditions), des natures d'études (contraintes, moments, efforts tranchants) et de charges (charges concentrées, réparties), des modèles (locaux ou globaux), etc.

Il s'agissait, pour un ensemble important de ponts représentatifs de la construction en Europe, de minimiser une fonctionnelle d'écart entre les résultats obtenus à partir de mesures de trafics réels européens (trafics autoroutiers et routiers), et ceux obtenus à partir de modèles paramétrés. De nombreuses optimisations (par les techniques de la Recherche Opérationnelle) ont été nécessaires pour arriver à un modèle répondant à des critères de simplicité et de cohérence, et ce malgré les paramètres multiples en jeu, tels que le nombre d'essieux, leurs intensités, les lois de variation des charges réparties en fonction des types de ponts, en fonction des longueurs et largeurs chargées [1].

Or, si la sélection des ponts poutres, faisant partie du panel de calibration, était très fournie, il n'en était pas de même de la sélection des ponts plaques ou des hourdis. Cette lacune devait être comblée. C'est de cette vérification dont il est question. Bien sûr, les plaques étant des structures hautement complexes, le travail ne pouvait se passer de moyens informatiques puissants. Nous avons donc pu bénéficier, pour mener à bien cette opération, de l'appui technique de la Division Logiciels et Ouvrages Types du Sétra, plus particulièrement des logiciels MRB-EL (voir § 1.1) et TRAFIC (voir § 1.2). Afin de valider les résultats, des calculs manuels ont été également envisagés sur la base des abaques de Rüsche

(voir § 1.3). Mais avant de livrer les résultats, il nous paraît opportun de faire quelques rappels sur le calcul des structures sous charges de trafic.

### Spécificités du calcul des structures soumises à des charges mobiles

La détermination des effets extrêmes dus au trafic routier fait appel à des algorithmes spécifiques qui peuvent fonctionner indépendamment des algorithmes liés à la justification des sections résistantes des ponts. Les paramètres du trafic sont notamment définis à partir de notions et de données dites de topologie et/ou de mobilité, souvent difficilement compatibles avec celles du calcul des structures.

#### A. Notion de surface d'influence généralisée

Dans le domaine élastique, une surface d'influence exprime, au droit de certains points  $M_i$ , appelés points de charge, l'influence mécanique  $F$  d'une composante unitaire de charge (force verticale, couple) sur une composante d'étude (moment, réaction, différence de contraintes) mesurée en un point d'étude  $M$  (fig. 1).

L'effet  $E_c(M)$ , au point  $M$ , d'un système de charges concentrées de composantes verticales  $P_i$  (appliquées en  $M_i$ ) s'écrit alors :

$$E_c(M) = \sum_i P_i F(M_i).$$

De la même façon, l'effet  $E_r(M)$ , au point  $M$ , d'une charge répartie de composantes verticales  $p$  appliquée sur un domaine  $\Omega$  s'écrit :

$$E_r(M) = \int_{\Omega} p F d\Omega.$$

La connaissance de la fonction d'influence  $F$  permet donc de calculer rigoureusement les valeurs extrêmes d'une composante d'effort, sous l'effet de charges

concentrées et/ou réparties pouvant se déplacer sur une structure.

En effet, la fonction  $F$ , identifiée à une surface d'influence, comporte deux zones  $F^+$  et  $F^-$  qui correspondent respectivement aux valeurs positives et négatives de  $F$ . Ces deux zones sont délimitées par des curvilignes (appelées lignes de zéros) le long desquelles la fonction  $F$  est nulle.

#### B. Utilisation des surfaces d'influence

L'utilisation des surfaces d'influence permet principalement de positionner, sans trop tâtonner, les essieux des véhicules aux endroits où les valeurs de  $F$  sont les plus importantes. En chaque point d'application d'une roue, l'effet est calculé par multiplication de la cote de la surface d'influence par l'intensité de la charge (fig. 1).

Lorsque les surfaces d'influence ne sont pas connues, il n'est pas possible de déterminer simplement la position des charges donnant les effets extrêmes. Les charges mobiles qui interviennent dans l'expression des valeurs extrêmes ne peuvent être connues en placement et en nombre qu'a posteriori. Il faut alors faire plusieurs calculs et procéder par « cas de charge équivalent » en essayant différentes positions de la charge en situation défavorable.

Avec le nouvel Eurocode de charges, la détermination des effets extrêmes de trafic dans les ponts peut s'avérer inextricable sans l'apport des surfaces d'influence.

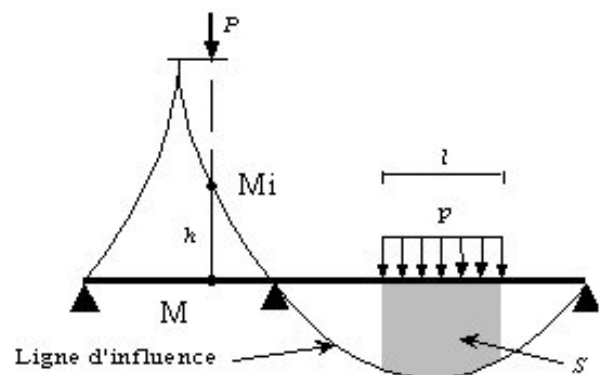


Fig. 1 - Ligne d'influence de moment fléchissant dans le cas d'une poutre continue : l'effet de la charge concentrée  $P$  est égal au produit  $Ph$  ; l'effet de la charge localement répartie d'intensité  $p$  est égal au produit  $Sp$ .

**C. Application des charges de type uniformément réparties**

Les charges de type uniformément réparties doivent être appliquées, en situation défavorable, entre les zéros de surfaces d'influence. Il faut donc :

- connaître les courbes de niveau, et notamment celles des zéros, des surfaces d'influence,
- définir les points d'intersection de ces courbes avec les axes des voies de circulation,
- mesurer les longueurs chargées sur chaque voie de circulation, lorsque l'intensité de la charge du système dépend de la longueur chargée
- calculer numériquement les intégrales.

**Les actions du trafic routier**

Les actions variables (ou actions « de courte durée »), peuvent se renouveler un certain nombre de fois au cours d'une période de référence R. Leur durée varie de quelques secondes à quelques heures.

Les valeurs représentatives des actions variables sont définies par rapport à une période T dite « période de retour » (généralement supérieure ou égale à mille ans) qui est l'invariant permettant de relier la période de référence R à une probabilité p de *dépassement de niveau* par la formule :

$$T = R/p$$

Ces valeurs représentatives peuvent être :

- des valeurs caractéristiques, valeurs extrêmes ayant une probabilité p de dépassement au cours d'une durée de référence R de quelques dizaines d'années (50 ans ou 100 ans) ;
- des valeurs rares ou peu fréquentes, dont la période de retour est égale à une année ;

Largeur l de la chaussée	Nombre n de voies	Largeur d'une voie
$l < 5,4$ m	$n = 1$	3 m
$5,4 \leq l < 6$ m	$n = 2$	$l / 2$
$l \geq 6$ m	$n =$ partie entière (l / 3)	3 m

Tableau 1 - Nombre et largeur des voies en fonction de la largeur de la chaussée.

- des valeurs fréquentes, dont la période de retour est de quelques jours (une semaine).

Les actions variables comprennent principalement les actions d'exploitation comme les charges de trafic routier ou ferroviaire et leurs effets dynamiques (le freinage ou l'accélération des véhicules). Ces charges sont applicables sur les ouvrages ouverts à la circulation des véhicules : les planchers, les plates-formes d'accès, les tabliers de pont, les dalles de parking, etc.

**A. Partage de la chaussée**

Le partage « naturel » de la chaussée en voies de chargement est fonction de la surface d'influence étudiée et de la largeur de la chaussée. La notion de voie de circulation est une notion essentielle. La définition des voies réglementaires n'est pas toujours liée à la signalisation et au marquage sur la chaussée. Toutefois, dans la réalité, les voies sont identifiées à partir de trafics spécifiques (fig. 2) et peuvent valablement être déduites de grandeurs générales comme la largeur de la chaussée (largeur entre bordures de trottoirs ou entre barrières de sécurité). La chaussée est alors conventionnellement partagée en un certain nombre de voies (pas nécessairement contiguës) par division entière de la largeur totale par une largeur unitaire de référence (3 m dans la plupart des cas, voir tableau 1).

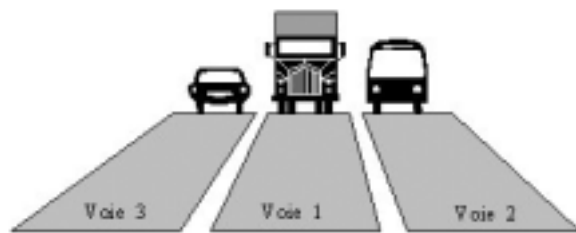


Fig. 2 - Exemple de partage de la chaussée en voies de circulation identifiées (par ordre d'importance) à partir de trafics spécifiques.



### B. Modèles de charges pour le calcul des valeurs caractéristiques – Configuration des charges

Les actions du trafic sont applicables sur les chaussées, les trottoirs ou toute autre surface de roulement. Les modèles doivent être placés de manière à donner les effets maximaux ou minimaux les plus défavorables.

#### a) Effets généraux

Pour l'étude des effets généraux dans un tablier de pont, les actions normales de trafic sont appliquées sur des voies de 3 mètres de large (en général). Quatre types de voie (pour le calcul des valeurs caractéristiques), pas nécessairement contiguës, sont identifiés (fig. 3) :

- la voie 1 : la voie principale (la plus chargée) comprenant une charge uniformément répartie constante de  $q_{1k}=9\text{kN/m}^2$  et un tandem de 600kN (2 essieux de 300kN) ;
- la voie 2 : la voie secondaire comprenant une charge uniformément répartie (UDL) constante de  $q_{2k}=2,5\text{kN/m}^2$  et un tandem de 400kN (2 essieux de 200kN) ;
- la voie 3 : une troisième voie comprenant une charge uniformément répartie constante de  $q_{3k}=2,5\text{kN/m}^2$  et un tandem de 200kN (2 essieux de 100kN) ;
- le reste de la chaussée comprenant une charge uniformément répartie constante de  $q_{rk}=2,5\text{kN/m}^2$ .

Il n'est pas possible (nous l'avons vu) d'effectuer un calcul des effets extrêmes précis sans l'aide des surfaces

d'influence. Le partage de la chaussée est donc différent pour chaque point étudié et obéit aux règles suivantes :

- les 3 voies et le reste de la chaussée sont disposés parallèlement à l'axe du pont de manière à ce que les tandems et/ou les UDL des voies produisent l'effet cumulé le plus défavorable ;
- les tandems sont centrés sur les voies et doivent être pris en totalité (les 4 roues) si leur effet est défavorable (fig. 3-a) ;
- les UDL peuvent être appliquées sur des parties de voies, zone positive ou négative selon le cas, entre lignes de zéros.

#### b) Effets locaux (semi-locaux)

##### Modèles

Les effets locaux (semi-locaux) sont déterminés à partir d'un essieu (ou d'un groupe d'essieux) ou, le cas échéant, d'une roue (ou d'un groupe de roues). Les essieux ou les roues peuvent être appliqués en des points quelconques de la chaussée en situation défavorable. La configuration de charges est obtenue de façon exclusive à partir :

- de tandems du modèle 1 en considérant que les tandems peuvent ne plus être centrés sur l'axe des voies et rouler de front à une distance transversale de 0,5 mètre minimum entre extérieurs des roues les plus proches (fig. 3-b). La surface de contact de chaque roue est alors de 0,40 x 0,40 m ;

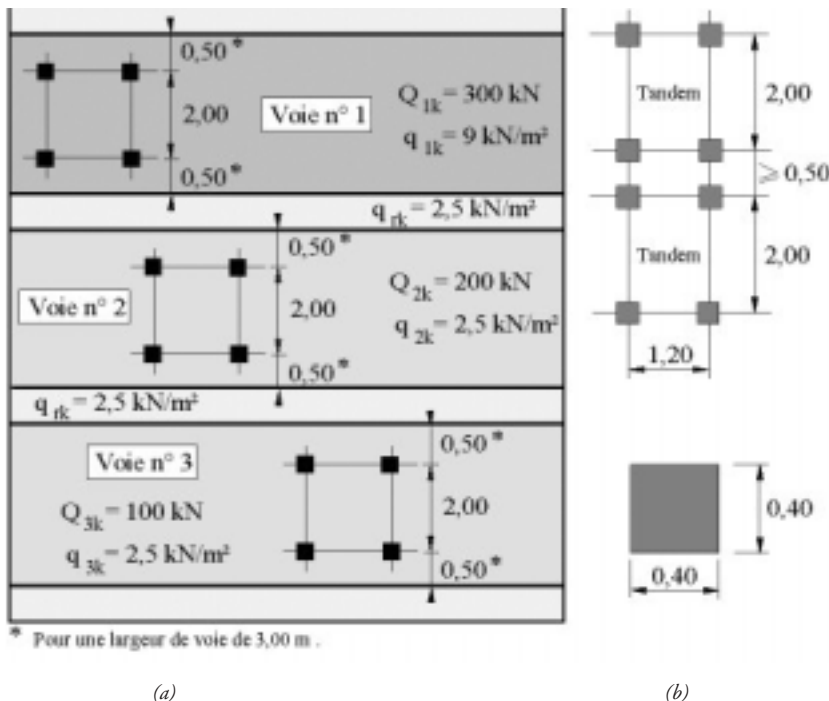


Fig. 3 - Modèle de charge (modèle 1) selon l'Eurocode 1991-2 :  
 a) pour le calcul des effets généraux ;  
 b) pour le calcul des effets semi-locaux et locaux.

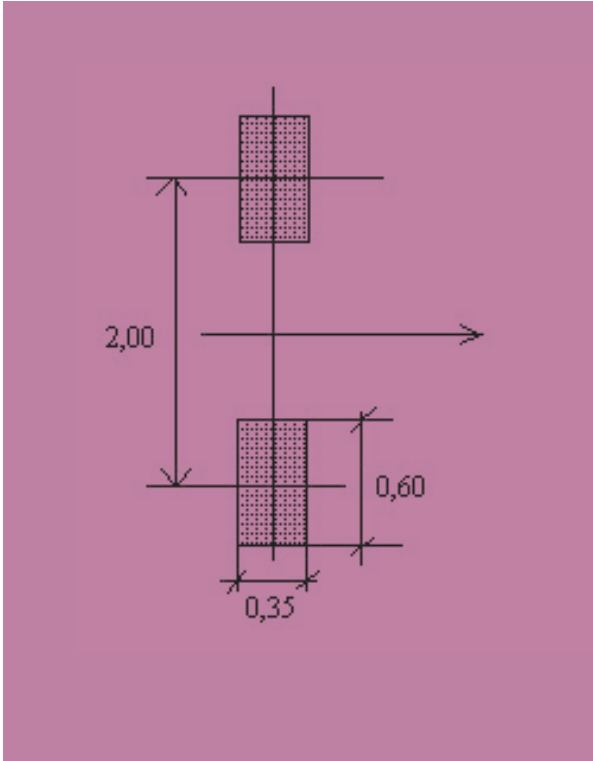


Fig. 4 – Modèle de charges alternatif pour le calcul des effets locaux (modèle 2).

- de l'essieu unique du modèle 2 ( $Q_k=400\text{kN}$ ) constitué de roues jumelées distantes de 2 mètres (fig. 4). La surface de contact de chaque roue est ici de  $0,35 \times 0,60\text{m}$ .

*Diffusion des charges localement réparties*

Les charges des roues sont localement réparties sur des aires de contact rectangulaires et sont appliquées au niveau des surfaces de roulement qui sont excentrées par rapport au plan moyen des hourdis épais. Lorsque les modèles de calcul sont construits à partir d'éléments de plaque, la configuration des charges modélisées, appliquées au plan moyen, ne correspond plus à celle des charges appliquées sur la surface de roulement. Il faut alors tenir compte de la diffusion de la charge dans l'épaisseur (fig. 5).

Cette diffusion se traduit par une diminution de la contrainte normale en fonction de la profondeur. Sous la surface de contact, d'aire  $A$ , la contrainte appliquée est égale à  $P/A$  où  $P$  représente l'intensité de la charge totale. À une certaine profondeur, la contrainte moyenne diminue. Il faut cependant retrouver la charge totale appliquée. Ceci implique que la surface d'application de la charge s'est agrandie. Ce phénomène est appelé diffusion de la charge.

La diffusion dépend principalement du type de pression exercée, du matériau et de la réponse des couches non résistantes interposées entre la surface de contact de la

charge réelle et l'ouvrage. Toutefois, les règles suivantes peuvent être admises, sauf spécification contraire :

- une charge réelle uniformément répartie constante se transforme en charge répartie constante ;
- dans le cas des dalles de béton, la charge modélisée est appliquée au niveau du plan moyen sur une surface qui se déduit, par homothétie, de la surface de contact de la charge réelle ;
- dans le cas des dalles orthotropes, la charge modélisée est appliquée au niveau du plan moyen de la tôle de peau sans compter les augets ;
- les charges peuvent moins diffuser à travers les couches non résistantes (couches de roulement) qu'à travers les couches résistantes (dalles en béton).

*Note :*

*Il est admis qu'en première approximation la fissuration ne modifie pas la distribution des efforts internes. La diffusion se fait généralement selon une pente voisine de 1 pour 1. Dans le cas des structures de poutres, il n'est pas nécessaire de considérer cette répartition à 45°.*

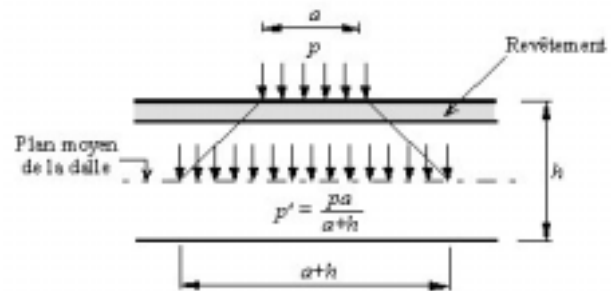


Fig. 5 – Diffusion des charges : une charge de densité, appliquée sur un carré de côté  $a$  (sur l'extrados) au-dessus d'un revêtement d'épaisseur  $e$ , se transforme, au niveau du plan moyen d'une dalle d'épaisseur  $h$ , en une charge de densité  $p'$  telle que  $p'a = pa$  appliquée sur un carré de côté  $a' = a+h+2e$ .

## Logiciels MRB-EL et TRAFIC

### MRB-EL

Les ponts-dalles en béton armé ou en béton précontraint sont largement répandus. De par la simplicité de leur forme, les coffrages et le façonnage des ferrillages sont facilement réalisés, ce qui se répercute favorablement sur les coûts. Etant bien souvent coulés sur cintres, ces ouvrages peuvent avoir une géométrie en plan assez complexe. Il n'est donc pas rare de devoir calculer des ponts dalles de courbure ou de biais prononcés.

Le programme MRB-EL permet d'étudier ces tabliers-dalles de biais et de courbure prononcés. Le principal attrait du logiciel est qu'il fournit très rapidement les surfaces d'influence des moments longitudinaux, transversaux ou croisés pour des points d'études choisis sur un maillage pré-défini.

La méthode utilisée est celle développée par Jean Leray, professeur au Collège de France, connue sous le nom de *Méthode de Réflexion Bi-harmonique* (M.R.B.). Celle-ci est basée sur le modèle d'une bande infinie à bords libres parallèles, homogène, isotrope, sans poids, appuyée et chargée de manière quelconque. On suppose valable le principe de Saint-Venant selon lequel les contraintes d'un corps élastique tendent rapidement vers zéro à l'extérieur du domaine d'application des charges. Ainsi, au-delà des appuis et des charges extrêmes, les deux bouts infinis de la bande sans poids n'emmagasinent qu'une énergie interne faible. La déformation et la tension de la bande infinie non pesante diffèrent donc peu de celles de la plaque qui s'en déduit par suppression des bouts infinis. C'est sur la base de ces hypothèses que Jean Leray a donné un certain nombre de résultats concernant la construction de la fonction de Green biharmonique applicables aux calculs des plaques à bords libres parallèles. Un développement de la théorie existe dans l'annexe 3 du guide de calcul du logiciel MRB-EL [2].

### TRAFIC

Le paquetage TRAFIC permet de calculer les effets enveloppes et des effets concomitants résultant de l'application de charges mobiles et/ou fixes sur des surfaces d'influences quelconques. La plupart des modèles de charges et de modalités d'application en vigueur dans les principaux pays industrialisés peuvent être pris en compte. Il permet aussi bien l'étude des charges routières que ferroviaires. Il recherche l'effet enveloppe strictement défavorable ou l'effet enveloppe exact tel qu'il est utilisé dans les convois de fatigue. Un certain nombre de paramètres permettent d'ajuster le système de charges et ses modalités d'application en fonction des objectifs visés.

Le paquetage TRAFIC a été développé à partir d'un autre paquetage appelé GENESYS TRAFIC développé

par M. Prat. Ce paquetage a notamment permis la calibration du modèle de charge de l'Eurocode 1 partie 3. Les développements mis en œuvre pour aboutir au paquetage TRAFIC ont été réalisés sous la direction de J. Gual [3]. Les développements les plus remarquables sont la mise en œuvre de l'extrapolation linéaire transversale des surfaces d'influence, la possibilité de définir des convois à  $n$  essieux, l'introduction de coefficients pour les effets favorables, etc.

### 1.3. Abaques de Rüsç

Les abaques de Rüsç [4] constituent une généralisation des travaux de K. E. Robinson [5]. Les surfaces d'influence ont été calculées par intégration de l'équation fondamentale de Lagrange sur un schéma numérique aux différences finies avec les conditions aux limites appropriées :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q(x,y)}{\Delta}$$

avec  $w$  la déformation verticale de la dalle et  $q$  la charge appliquée à la dalle en  $(x,y)$ . Le paramètre  $\Delta$  dépend ici du coefficient de poisson, du module d'élasticité et de l'épaisseur de la dalle. Chaque moment, exprimé par mètre dans la direction normale à celle de la contrainte engendrée par le moment, est ensuite calculé par différentiation :

$$M_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, M_y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \text{ et } M_{xy} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

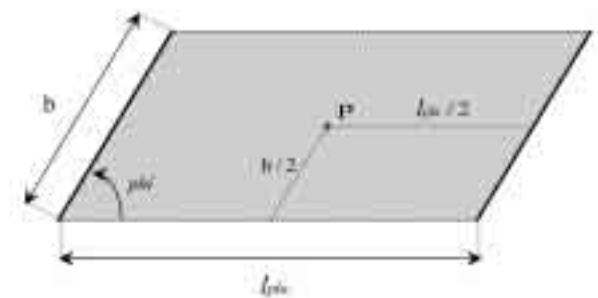


Fig. 6 - Modèle de dalle biaisée.

Afin de valider les résultats obtenus, des essais en laboratoire ont été menés. La précision sur les valeurs des surfaces d'influence a pu alors être estimée à environ 10 %. En particulier, la discrétisation employée ne permet pas de garantir la qualité des résultats au voisinage des bords libres.

## Etude de cas

Nous nous intéressons donc à l'étude de tabliers-dalles de biais prononcé à une travée. On peut caractériser ces ouvrages par trois paramètres : la largeur biaise  $b$ , le rapport entre la longueur du bord libre  $l_\varphi$  et la largeur biaise et l'angle  $\varphi$  entre la ligne d'appui et le bord libre.

Nous avons choisi de traiter le cas  $b/l_\varphi = 0,4$  en faisant varier l'angle  $\varphi$  : les trois biais considérés  $\varphi = 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ . Tous les ouvrages étudiés ont une largeur droite de 8 mètres de telle sorte que les longueurs des bords libres sont de 23, 28 et 40 m respectivement. La précision des résultats donnés par les abaques de Rüschi étant supposée se dégrader lorsque le point d'étude se rapproche des bords libres, nous avons opté pour un point d'étude P situé au milieu de la dalle comme on le voit sur la *figure 6*.

Sur la *figure 7.a* est représentée la surface d'influence du moment longitudinal divisée par  $8\pi$ . Les lignes en pointillé représentent une graduation de 1 alors que les lignes en trait plein représente une graduation de 10. Même si les surfaces calculées par MRB-EL et par Rüschi ont la même allure, il existe des écarts non négligeables entre les surfaces d'influence comme on peut le constater sur la *figure 7.b* où l'on a représenté la différence entre les surfaces fournies par MRB-EL et celles des abaques de Rüschi. Les lignes en trait plein représentent la ligne de différence nulle alors que les lignes pointillées représentent une graduation de 0,1.



Fig. 7.a - Surface d'influence du moment de flexion longitudinal ( $\varphi = 60^\circ$ ).



Fig. 7.b - Différence entre les surfaces d'influence MRB-EL et Rüschi pour le moment de flexion longitudinal ( $\varphi = 60^\circ$ ).

Sachant que les surfaces d'influence de Rüschi ont une précision estimée à environ 10 %, et dans le but de ne pas rajouter de l'erreur inutilement, nous avons calé les surfaces d'influence de Rüschi sur les surfaces données par MRB-EL à l'aide d'une affinité effectuée sur la base de dix points appartenant aux axes longitudinaux et transversaux centraux de la plaque. Dans la suite de l'étude, nous ne commenterons que les écarts observés en pourcentage entre les deux méthodes de calcul.



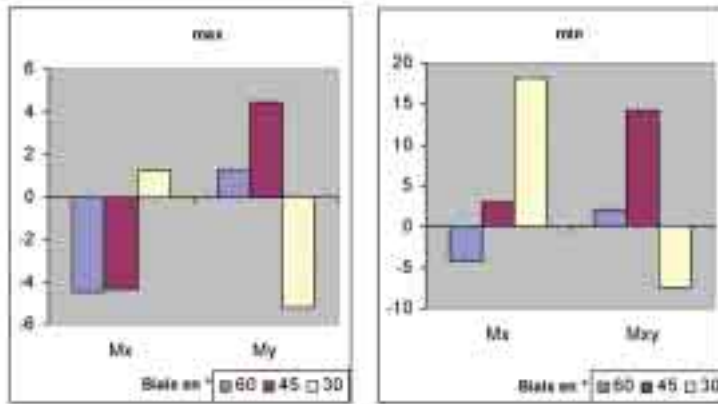


Fig. 8 - Ecart en % entre les effets enveloppes dus au TS.

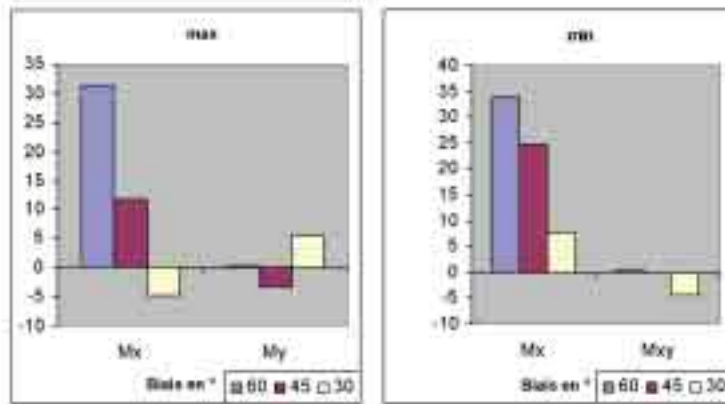


Fig. 9 - Ecart en % entre les effets enveloppe dus à UDL.

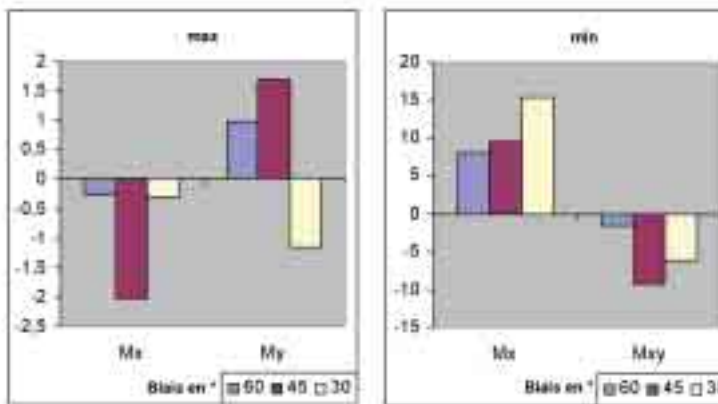


Fig. 10 - Ecart en % entre les effets enveloppes totaux.



### Effets des charges concentrées

Le calcul de l'effet des charges concentrées est réalisé sur la base d'une interpolation linéaire de la ligne d'influence, le maillage MRB étant choisi de manière à ce que les points d'application des tandems soient situés sur la ligne d'influence.

L'observation des effets dus aux charges concentrées permet de se faire une idée de l'adéquation entre les surfaces d'influence données par les abaques ou par MRB-EL, sans que le schéma d'intégration ne vienne interférer dans le calcul des effets enveloppes. Les effets enveloppes dus à l'application des tandems d'essieux sont représentés sur la *figure 8*.

Les écarts concernant les effets maxima sont tout à fait acceptables. En effet, ils sont tous dans une fourchette de plus ou moins 5 %, et ceci même pour le biais le plus élevé. Ces premiers résultats semblent valider le calage des surfaces d'influence (*tableau 2*).

Même si les minima des moments pour le biais le plus faible est très bien évalué, les autres moments minima ont une dispersion sensiblement plus élevée. Ainsi, on note un écart important, pour le biais le plus important, concernant le moment minimum de flexion transversale : l'effet donné par MRB\_TRAFFIC est en valeur absolue inférieur d'environ 20 % à celui déduit des abaques de Rüschi. Ceci s'explique par le fait que pour un biais important, le système TS s'applique très près des zones de la surface d'influence qui sont d'une fiabilité contestable puisqu'ils sont proches des bords libres. Or, il subsiste après calage un écart d'environ 25 % sur les minima entre MRB et les abaques.

### Effets des charges réparties

Nous nous intéressons à présent aux effets engendrés par le système de charge UDL. Aux erreurs imputables aux surfaces d'influence viennent s'ajouter les erreurs dues au schéma d'intégration utilisé. En effet, contrairement à ce qui est effectué dans TRAFIC, l'intégration faite à partir des surfaces d'influence de Rüschi est mise en œuvre le long des coupes longitudinales de la surface.

	Biais de 60°		Biais de 45°		Biais de 30°	
	max	min	max	min	max	min
M <sub>x</sub>	93,1	-43,6	144,0	-62,2	299,8	-58,8
M <sub>y</sub>	547,9	0	474,4	0	394,3	0
M <sub>xy</sub>	0	-144,7	0	-228,9	0	-334,5

Tableau 2 - Effets enveloppes en MN.m dus au chargement TS calculés par MRB-TRAFIC.

Le schéma d'intégration choisi est très simple : longitudinalement, nous interpolons linéairement chaque ligne d'influence puis nous l'intégrons selon un schéma de Newton-Cotes d'ordre 1 ; nous multiplions ensuite l'intégrale obtenue par une largeur donnée, ce qui revient à effectuer une interpolation transversale constante de part et d'autre de la ligne sur une largeur totale correspondante à la distance entre les lignes d'influence, c'est-à-dire 1 mètre dans les cas traités (*fig. 9*).

Cette différence particulière est à la base des problèmes rencontrés lors du calcul des moments transversaux induits par le chargement UDL. On constate en effet un écart de 30 % sur ces moments transversaux pour le biais le plus faible. Cette erreur s'amenuise lorsque le biais augmente. Ceci s'explique par le fait que l'interpolation transversale constante est très mauvaise pour les biais faibles puisque la surface est transversalement très raide sur les bords libres, alors qu'elle est moins pénalisante, en terme de précision, pour les biais plus prononcés qui ont des lignes d'iso-moment moins proches de la tangente aux bords libres et qui peuvent donc être pris en compte lors de l'intégration de la ligne d'influence (*tableau 3*).

D'autre part, on remarque que les écarts concernant les effets enveloppes des moments de flexion longitudinale et des moments croisés sont inférieurs à 10 % en valeur absolue.

### Effets totaux

Les effets totaux sont obtenus par sommation des effets des charges concentrées et réparties. Le rapport entre les effets des charges réparties et les effets des charges concentrées est compris entre 0,15 et 0,5 environ. Les différences soulignées sur les effets induits par les charges concentrées seront donc prépondérantes dans l'écart observé sur les effets totaux à l'aide de la *figure 10*.

	Biais de 60°		Biais de 45°		Biais de 30°	
	max	min	max	min	max	min
M <sub>x</sub>	17,1	-12,9	28,5	-21,2	93,4	-23,4
M <sub>y</sub>	237,2	0	241,5	0	267,5	0
M <sub>xy</sub>	0	-48,2	0	-105,5	0	-222,9

Tableau 3. Effets enveloppes en MN.m dus au chargement UDL calculés par MRB-TRAFIC.

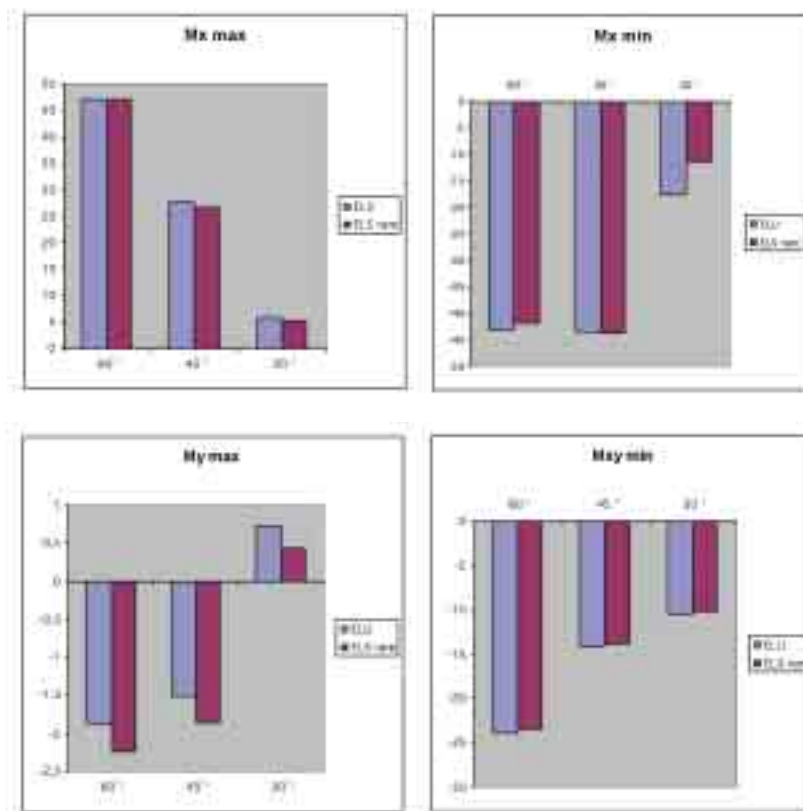


Figure 11. Variations observées par le passage aux charges européennes. Ces variations sont exprimées en % par rapport aux effets enveloppes induits par les charges françaises du fascicule 61.

Les résultats concernant les effets maxima sont très bons puisqu'ils sont compris entre  $-2\%$  et  $+2\%$  par rapport aux effets calculés à l'aide des abaques de Rüschi (tableau 4).

Pour ce qui est des moments minima, les résultats, même s'ils sont moins bons restent dans la limite des  $10\%$  en valeur absolue, ce qui reste du même ordre de grandeur que la précision avérée des surfaces d'influence des abaques de Rüschi. Seule ombre au tableau, le cas du moment de flexion transversale qui, pour un biais de  $30^\circ$ , s'écarte de plus de  $15\%$  des résultats obtenus à

partir des abaques. Ceci résulte de la conjugaison de l'erreur sur les surfaces d'influence et de l'erreur induite par les schémas d'intégration différents.

## Conclusion

Les résultats donnés par le logiciel MRB\_TRAFFIC sont cohérents. En effet, onze des douze effets enveloppes calculés par trafic rentrent dans la fourchette des  $10\%$  autour des valeurs calculées à l'aide des abaques de

	Biais de $60^\circ$		Biais de $45^\circ$		Biais de $30^\circ$	
	max	min	max	min	max	min
Mx	110,2	-56,5	172,4	-83,4	393,2	-82,2
My	785,1	0	715,9	0	661,8	0
Mxy	0	-192,9	0	-334,5	0	-557,4

Tableau 4. Effets enveloppes totaux en kN.m calculés par MRB-TRAFIC.

Rüsch. En fait, les écarts conséquents constatés le sont pour les effets minima uniquement, les effets maxima étant eux dans une fourchette de plus ou moins 2 %.

Nous pouvons à présent nous interroger sur la comparaison des effets enveloppes induits par les charges européennes de l'Eurocode 1 avec ceux induits par les charges françaises du fascicule 61. On applique pour cela à la structure les combinaisons ELU et ELS rare des deux règlements en ne considérant pas de charges d'accompagnement. Les résultats sont synthétisés sur la *figure 11*.

On constate ainsi que, si les moments enveloppes longitudinaux induits par les charges européennes et françaises sont assez proches, il n'en est pas de même pour l'enveloppe du moment transversal. L'augmentation en valeur absolue des moments transversaux enveloppes atteint en effet (pour le biais le plus faible) plus de 45 % ■

### Références

- [1] M. Prat, Traffic load models for bridge design – Recent developments and research, PSE 091 – Progress in Structural Engineering and Materials, John WILEY, London, 2002.
- [2] A.L. Millan, H. Huynh, V. Le Khac, Programme de Calcul MRB-EL, Guide de calcul, Setra-Ctoa, 1995.
- [3] J. Gual, M. Prat, Paquetage Trafic, Présentation et notice d'emploi, Setra-Ctoa, 1994.
- [4] H. Rüsch, A. Hergenröder, Einflussfelder der momente, schiefwinkliger platten, TH München, 1964.
- [5] K. E. Robinson, The behaviour of simply supported skew bridge slabs under concentrated loads, Research Report 8, Cement and Concrete Association, London, 1959.

### Remerciements

Nous tenons à remercier Claude Simon, Philippe Brehmer et Eric Forterre pour leur disponibilité et les discussions enrichissantes que nous avons eues sur le sujet. Les surfaces d'influence ont été représentées par Philippe Brehmer à l'aide du logiciel Opéra.



## STAGES

### FORMATION ENPC DANS LE DOMAINE DES OUVRAGES D'ART

Cycle de base : La géotechnique et ses applications 2 <sup>ème</sup> partie	29 et 30 janvier 2004
Cycle Inspection des ouvrages d'art – module 1 : Connaissance de base 1 <sup>ère</sup> partie	3 au 5 février 2004
Cycle Inspection des ouvrages d'art – module 1 : Connaissance de base 2 <sup>ème</sup> partie	9 au 11 mars 2004
Pratique du calcul par éléments finis en génie civil	9 au 11 mars 2004
Cycle de base : La géotechnique et ses applications 3 <sup>ème</sup> partie	11 mars 2004
Cycle formations aux Eurocodes - Eurocode 8 : principes, contenu, conséquences pratiques	16 au 18 mars 2004
Gestion et réparation des ouvrages de soutènement	18 et 19 mars 2004
Conception, exécution et pathologie des dallages	23 et 24 mars 2004
Exécution des ouvrages métalliques et mixtes : la nouvelle norme européenne EN 1090	24 et 25 mars 2004
Stabilité des pentes et des ouvrages en pente	29 au 31 mars 2004
Pratique de la mise en œuvre et de la réparation du béton en montagne	30 mars 2004
Les nouvelles normes d'exécution des travaux géotechniques	30 et 31 mars 2004
Bétons et nouvelles performances - Les BHP : bétons hautes performances	1 <sup>er</sup> avril 2004

Renseignements et programmes détaillés des stages ENPC :

tél : 01 44 58 27 28 ou site : <http://pfe.enpc.fr>

Renseignements concernant les cycles internationaux :

tél : 01 44 58 28 28 ou 28 27.

### Lu dans le Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées

Le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées a publié dans le numéro 240 de Septembre Octobre 2002 une très intéressante note technique intitulée :

#### Chapes d'étanchéité de pont.

Le point sur les problèmes de gonflement des chapes d'étanchéité et les procédés bouche-pores.

par MM. Jean-Paul Benetton et Michel Fragnet.

Cette note fait le point sur le phénomène de gonflement des chapes d'étanchéité, les causes probables et les solutions de prévention.

Parmi ces solutions, celle qui consiste à mettre en œuvre un "bouche-pore" fait l'objet d'un important développement avec le point des recherches sur le sujet dans le réseau technique.

Pour ceux qui seraient intéressés par le sujet, nous signalons les deux références bibliographiques rappelées dans cette note et qui abordent de façon approfondie le sujet.

MICHEL FRAGNET

### Une nouvelle collection dans les publications du Sétra.

Une nouvelle collection "Les rapports d'étude" rejoint les rangs des publications du Sétra. Ces documents sont destinés à faire connaître plus rapidement notre travail. Ainsi plus besoin d'attendre l'achèvement d'une œuvre complète avant de diffuser le contenu d'un chapitre s'il se suffit à lui-même pour sa compréhension. Les Rapports d'études n'ont pas la prétention d'être complètement validés et cette collection spéciale les préserve de toute confusion avec le statut d'un Guide Sétra. Le CTOA inaugurera dans cette collection, à l'occasion de la publication du travail réalisé avec l'aide des Divisions d'Etudes, une série sur les eurocodes : études de cas, exemples de calcul, comparaisons entre règlements... Vous en reconnaîtrez facilement la charte graphique, notre marque d'édition.

HÉLÈNE ABEL



## PUBLICATION

### • Avis technique - Étanchéité des ponts-routes

Les avis techniques fournissent un avis officiel sur le comportement prévisible des produits, procédés et matériels pour éclairer les maîtres d'ouvrages et les maîtres d'œuvre dans leurs décisions.

Ces avis techniques ont été préparés sous la responsabilité d'une commission mise en place par le Sétra, associant l'administration et la profession représentée par les syndicats.

Le secrétariat et la présidence de cette commission sont respectivement assurés par le Sétra et la profession.

L'élaboration d'un avis technique est soumise aux étapes suivantes :

- dépôt de la demande ;
- enquête préalable (s'il s'agit d'une première demande jugée recevable) ;
- examen du dossier technique et établissement du programme d'essais ;
- établissement d'un avis technique.



Produit	Entreprise	Date	Validité	Réf.
Asphalt Pont	Asten	05-2003	05-2008	FATET03-02

*Rappel : le prix de chaque avis technique est de 3,05 €*

**A consulter où à télécharger sur le WEB**

Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>

I2 (réseau intranet du ministère de l'Equipement) : <http://intra.setra.i2>

• **Construction des ouvrages d'art**

Depuis sa mise en ligne en août 2003, ce recueil a provoqué plus de 7000 téléchargements.

• **Rapport d'activités 2002 du Sétra**

Outre des éléments de présentation institutionnelle du Sétra et du réseau scientifique et technique de l'Equipement, et la liste des productions (documents, logiciels) de l'année, ce rapport d'activités présente, sous forme de multiples zooms, quelques réalisations plus particulières ou marquantes du Sétra en 2002, selon une double grille de lecture :

- par enjeux : sécurité, patrimoine, environnement, échanges, normalisation, déplacement
- par domaines d'activités, correspondant à l'organisation du réseau scientifique et technique de l'Equipement et du Sétra.



• **Site du ministère de l'Equipement à Durban**

La présence du ministère de l'Equipement lors du dernier congrès mondial de la route à Durban (19 au 24 octobre) s'est concrétisée en particulier par un stand d'exposition au sein du pavillon français. Ce stand a été structuré autour de sept thèmes de communication (environnement, technicité, sécurité, échanges, patrimoine, déplacement, normalisation), chacun repérable par une colonne graphique lumineuse renvoyant à une ou deux bornes interactives, organisées tels des sites web, où les visiteurs ont pu naviguer et consulter de multiples powerpoints, diaporamas, fiches de synthèse et documents en texte intégral illustrant la technicité et des réalisations des services du ministère. A consulter aussi la rubrique "librairie", riche de nombreuses références bibliographiques et documents en texte intégral, et la lettre du congrès mondial de la route éditée et diffusée à cette occasion.



Logo du 23<sup>e</sup> congrès mondial de la route AIPCR

**A noter sur vos agendas : le prochain congrès mondial de la route aura lieu à Paris du 16 au 22 septembre 2007.**





## COORDONNEES DES REDACTEURS

---

Michel FRAGNET  
Sétra CTOA  
Tél : 01 46 11 32 13

Dominique VULIN  
Société DR Equipement  
Tél : 04 78 55 50 71

Guillaume VEYLON  
Sétra CTOA  
Tél : 01 46 11 34 95

Michel PRAT  
Sétra CTOA  
Tél : 01 46 11 32 04

Jean GUAL  
Sétra CTOA  
Tél : 01 46 11 32 06

Hung HUYNH  
Sétra CTOA  
Tél : 01 46 11 32 49

Pierre PEYRAC  
DREIF

Jean-Armand CALGARO  
Conseil Général des Ponts

Ferry TAVAKOLI  
CETE Lyon - DOA  
Tél. 04 74 27 53 84

### BON DE COMMANDE POUR RECEVOIR LES PUBLICATIONS DU CTOA

je désire recevoir

TITRE

Réf.

Prix unitaire

Retournez votre commande – ou faxez-la – à : Service d'études techniques des routes et autoroutes  
Bureau de vente • BP 100 - 92225 Bagneux Cedex  
Tél. 01 46 11 31 53 - Fax. 01 46 11 33 55

exemplaire(s)      Nom et adresse du demandeur :

Prix total

Tél :

Date :

Signature

**Frais d'envoi** (à ajouter au montant de la commande) : 3,50 € pour toute commande inférieure à 20 € et 4,57 € pour toute commande égale ou supérieure à 20 €

**Autres pays** : 10 % du montant de la commande avec un minimum de 7 €

**Mode de règlement** (à réception de facture) : chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des recettes du Sétra • 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

Nom :

Service, société :

Adresse :

Tél :

Date :

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

Ce bulletin de liaison vous intéresse ... retournez ce formulaire ci-dessous à :

Bulletin de liaison OUVRAGES D'ART • SETRA-CTOA (Christine Tardy)  
46, Avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux cedex



46 avenue  
Aristide Briand  
BP 100  
92225 Bagneux Cedex  
France  
téléphone :  
33 (0)1 46 11 31 31  
télécopie :  
33 (0)1 46 11 31 69  
internet : [www.setra.  
equipement.gouv.fr](http://www.setra.equipement.gouv.fr)

Le bulletin « Ouvrages d'art » est un périodique d'information à l'intention des spécialistes d'ouvrages d'art. Il est destiné à décrire la construction d'ouvrages marquants et à faire connaître des techniques particulières ou innovantes.

Ce bulletin est désormais consultable et téléchargeable :

- sur internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>
- sur I<sup>2</sup> (réseau intranet du ministère de l'Équipement) : <http://intra.setra.i2>

Document disponible au bureau de vente du Sétra  
46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France  
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 53 - télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55  
Référence : PO544 - prix : 10 €

L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document

Le nouveau pont de Jonches : photos Ferry Tavakoli

La sécurité sur un passage inférieur très court : photos DR Équipement

Le Sétra appartient  
au Réseau Scientifique  
et Technique  
de l'Équipement

