

Jean-Armand CALGARO

**PROJET
ET
CONSTRUCTION
DES PONTS**

**Généralités • Fondations •
Appuis • Ouvrages courants**

Presses de l'école nationale des
Ponts et chaussées



Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée, notamment dans l'enseignement, provoquant une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© 2000

ISBN 2-85978-327-X
3^e édition

ISBN 2-85978-159-5
2^e édition

ISBN 2-85978-095-5
1^{re} édition

Presses de l'école nationale des
Ponts et chaussées

28, rue des Saints-Pères
75007 Paris

Sommaire

AVANT-PROPOS	7
CHAPITRE 1 - Les ponts. Définitions. Données naturelles et fonctionnelles	9
CHAPITRE 2 - Les différentes étapes de l'élaboration d'un projet de pont routier	43
CHAPITRE 3 - Les affouillements	71
CHAPITRE 4 - Règles et normes techniques. Bases de la sécurité des constructions	93
CHAPITRE 5 - Le calcul des ponts: évaluation des actions	137
ANNEXE au chapitre 5- Quelques aspects particuliers du calcul des ponts	199
CHAPITRE 6 - Les équipements des ouvrages d'art	211
CHAPITRE 7 - Les fondations des ouvrages d'art. Généralités. Fondations superficielles	263
CHAPITRE 8 - Les fondations des ouvrages d'art. Fondations profondes sur pieux	299
CHAPITRE 9 - Les appuis de ponts. Les culées	337
CHAPITRE 10 - Les appuis de ponts. Les piles	367
CHAPITRE 11 - Les ouvrages courants en béton armé et précontraint	411
TABLE DES MATIÈRES	447

Liste et signification des principaux sigles employés dans le texte

AFGC	Association française de génie civil (elle est née de la fusion, en 1997, de l'AFPC et de l'AFREM)
AFNOR	Association française de normalisation
AFPC	Association française pour la construction (voir AFGC)
AFREM	Association française pour la recherche et les essais sur les matériaux et les constructions (voir AFGC)
AIPC	Association internationale des ponts et charpentes (IABSE en anglais)
APSI	Avant-projet sommaire d'itinéraire (projet routier)
ARP	Aménagement des routes principales (guide)
BAEL	Béton armé aux états-limites
BAU	Bande d'arrêt d'urgence
BDD	Bande dérasée droite
BDG	Bande dérasée gauche
BPEL	Béton précontraint aux états-limites
CCAG	Cahier des clauses administratives générales
CCAP	Cahier des clauses administratives particulières
CCBA	Calcul des constructions en béton armé (anciennes règles 1968)
CCTG	Cahier des clauses techniques générales
CCTP	Cahier des clauses techniques particulières
CEB	Comité euro-international du béton (voir <i>fib</i>)
CECM	Convention européenne de la construction métallique
CETMEF	Centre d'études techniques maritimes et fluviales (nouveau service, ayant remplacé en 1999 le STCPMVN)
CM	(Règles de calcul en) Construction métallique (anciennes règles 1966)
CPC	Cahier des prescriptions communes (ancienne désignation du CCTG)

DC	Directives communes (de 1979) relatives au calcul des constructions
DCE	Dossier de consultation des entreprises
DDE	Direction départementale de l'Équipement ¹
DR	Direction des routes du ministère de l'Équipement
DTU	Document technique unifié
DUP	Déclaration d'utilité publique
DVA	Dossier de voirie d'agglomération (projets routiers)
EN	Euronorme
ENV	Euronorme provisoire
EPOA	Étude préliminaire d'ouvrage d'art
<i>fib</i>	Fédération internationale du béton (créée en 1997, elle regroupe les anciennes associations CEB et FIP)
FIP	Fédération internationale de la précontrainte (voir <i>fib</i>)
ICTAAL	Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison (dernière édition 1985)
ICTARN	Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des routes nationales (texte remplacé par l'ARP)
ICTAVRU	Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines
INRETS	Institut national de recherche et d'études des transports et de la sécurité
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées
LIER	Laboratoire INRETS/Équipement routier
LOTI	Loi d'orientation des transports intérieurs (1982)
LNH	Laboratoire national d'hydraulique (dépendant de la Direction de la recherche et du développement d'EDF)
PHEC	Plus hautes eaux connues

1. Dans le présent ouvrage, l'appellation « ministère de l'Équipement » est utilisée systématiquement, indépendamment des variations de dénomination consécutives à certains changements de gouvernements.

PROJET ET CONSTRUCTION DES PONTS

PHEN	Plus hautes eaux navigables
PI	Passage inférieur
POA	Projet d'ouvrage d'art (non courant)
PS	Passage supérieur
RPAO	Règlement particulier de l'appel d'offres
SETRA	Service d'études techniques des routes et autoroutes
STCPMVN	Service technique central des ports maritimes et voies navigables (remplacé en 1999 par le CETMEF)
SMO	Schéma de maîtrise d'ouvrage (projets routiers)
TPC	Terre-plein central
ZICO	Zone importante pour la conservation des oiseaux
ZNIEFF	Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique

Avant-propos

La première version du présent ouvrage fut publiée en 1987. Après deux éditions successives, il apparut nécessaire d'en reprendre substantiellement forme et contenu pour tenir compte des évolutions les plus récentes des connaissances, des techniques, du contexte administratif national et européen, et des codes de conception et de calcul.

S'agissant du support d'un cours professé à l'École nationale des ponts et chaussées, il est toujours malaisé, au moment de le rédiger, d'en cerner le volume utile : chacun des chapitres traités pourrait, à lui seul, être l'objet d'une publication hautement spécialisée. Quoi qu'il en soit, l'objectif de cet ouvrage est double.

En premier lieu, il s'adresse aux étudiants des écoles de génie civil pour les aider à faire une synthèse des divers enseignements fondamentaux qu'ils reçoivent, directement liés à la construction d'ouvrages de génie civil : résistance des matériaux, béton armé et précontraint, construction métallique, mécanique des sols, procédés généraux de construction.

En second lieu, il a l'ambition de s'adresser à des ingénieurs débutants ou non-spécialistes qui peuvent avoir à assurer des fonctions de maîtrise d'œuvre dans le domaine des ponts. Ils devraient trouver, dans ce cours, le fil conducteur qui leur donnera une vue d'ensemble de la problématique de conception et de construction des ponts, ainsi que quelques pistes pour approfondir leurs connaissances.

C'est donc dans le souci de satisfaire les besoins de formation des étudiants ou des ingénieurs débutant une carrière technique, et d'information des ingénieurs maîtres d'œuvre, que la plupart des chapitres ont été rédigés. Certains d'entre eux pourront paraître, de prime abord, plus développés que d'autres ; c'est qu'ils traitent d'un sujet pour lequel la documentation pédagogique est peut-être moins riche ou moins accessible.

La plupart des chapitres fournissent une bibliographie sommaire. Comme nous l'avons dit, ce cours suppose une maîtrise de plusieurs disciplines fondamentales et il ne nous a pas semblé utile d'explicitier de longues listes d'ouvrages généraux qui ne sont pas directement axés sur la conception et la construction des ponts. D'ailleurs, lorsque l'on se trouve confronté à un problème particulier, la documentation doit être essentiellement recherchée dans les revues techniques et scientifiques spécialisées, et dans les guides édités par les services centraux du ministère de l'Équipement.

Sur le plan technique, nous traversons actuellement une période de transition qui verra très prochainement le remplacement des codes de calcul nationaux par des normes européennes. Plusieurs chapitres du présent ouvrage font référence à cette nouvelle base, encore provisoire, mais qui donne une idée suffisamment précise du futur décor de la conception et de la réalisation des ouvrages de génie civil. Il faut bien comprendre que, contrairement à ce que certains pensent et parfois claironnent avec un haut degré d'ignorance, les normes européennes ne brideront pas la créativité des ingénieurs : elles leur fourniront un cadre conceptuel qui les amènera, dans les cas non courants, à assumer un niveau de responsabilité plus élevé que par le passé. C'est pour cette raison que deux chapitres ont été particulièrement développés : le chapitre 4, décrivant les principaux concepts de la sécurité des constructions, et le chapitre 5, traitant de l'évaluation des différentes actions sollicitant les ponts. Ce sont des chapitres plus abstraits ou théoriques que les autres, mais qu'il nous a semblé indispensable de rédiger pour préparer les jeunes générations à de nouveaux modes de pensée dans l'art de construire.

Je serais particulièrement comblé si, en cette fin de siècle, les lecteurs prenaient du plaisir à lire ce livre.

Jean-Armand CALGARO
Août 1999

CHAPITRE 1

Les ponts - Définitions

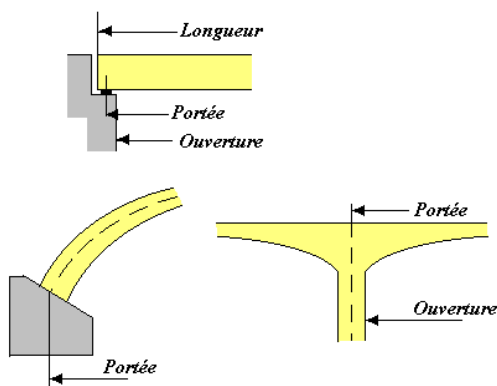
Données naturelles et fonctionnelles

1.1. INTRODUCTION

D'une façon générale, on appelle pont tout ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation. Selon le cas, on distingue : pont-route, pont-rail, pont-canal.

Cette définition est un peu imprécise dans la mesure où elle ne se réfère à aucune notion de dimension, de forme ou de nature d'ouvrage. Pour les petits ponts hydrauliques, on parle couramment de ponceaux ou de dalots. À l'inverse, on emploie de préférence le terme de viaduc lorsqu'il s'agit d'un ouvrage de grande longueur possédant de nombreuses travées et généralement situé en site terrestre. De même, une buse est un ouvrage de franchissement que l'on ne désigne jamais par le terme de pont, même si son ouverture est de dimension respectable. Enfin, certaines tranchées couvertes répondent à la définition d'un pont ; cependant, elles ne sont pas traitées dans le cadre de ce cours, car ce sont des structures dont la conception, le calcul et les procédés d'exécution les rattachent à une famille de constructions assez différente de celle qui nous concerne. En résumé, on appellera pont tout ouvrage de franchissement en élévation construit in situ, ce qui exclut les buses totalement ou partiellement préfabriquées.

UN PEU DE VOCABULAIRE



La partie d'un pont comprise entre deux appuis s'appelle une **travée**. La distance entre deux points d'appui consécutifs des éléments porteurs principaux est la **portée** de la travée (Fig. 1.1). La distance mesurée entre nus intérieurs de deux appuis consécutifs est l'**ouverture** de la travée.

Figure 1.1 – Définitions: portée, ouverture.

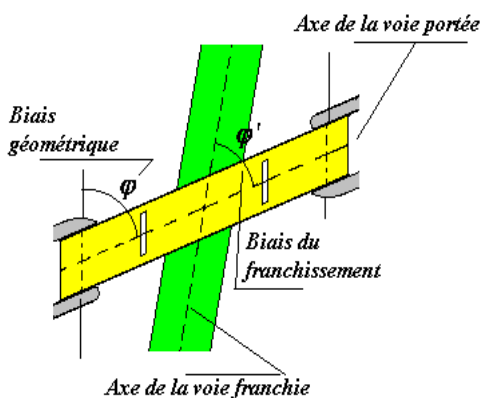


Figure 1.2 – Définition du biais géométrique.

Lors de l'établissement d'une voie nouvelle, les ponts courants à construire sont appelés **passages supérieurs** (PS) ou **passages inférieurs** (PI) suivant qu'ils enjambent ou qu'ils supportent cette voie nouvelle. Les ponts peuvent être droits, **biais** ou courbes selon leur disposition en plan. Conventionnellement, l'angle de biais géométrique est l'angle, exprimé en grades, compris entre l'axe longitudinal de l'ouvrage et les lignes d'appui transversales (Fig. 1.2).

Il ne doit pas être confondu avec le biais du franchissement qui mesure l'angle entre les axes des deux voies qui se croisent.

La conception d'un pont doit satisfaire à un certain nombre d'exigences puisqu'il est destiné à offrir un service à des usagers. On distingue les exigences fonctionnelles (ou données fonctionnelles) qui sont l'ensemble des caractéristiques permettant au pont d'assurer sa fonction d'ouvrage de franchissement, et les exigences naturelles (ou données naturelles) qui sont l'ensemble des éléments de son environnement déterminant sa conception.

1.2. LES DONNÉES FONCTIONNELLES

De manière générale, la construction d'un pont s'inscrit dans le cadre d'une opération plus vaste, par exemple une opération routière ou ferroviaire. L'implantation de l'ouvrage résulte donc d'un certain nombre de choix effectués au niveau de ladite opération. Le cadre du projet est donc fixé, et il n'est pas toujours possible de tant soit peu le modifier car le coût du pont est souvent faible devant celui de l'opération. Toutefois, en site urbain ou lorsque se posent des problèmes majeurs de fondations, le choix du tracé doit impérativement tenir compte des ouvrages dont le coût relatif peut alors être exceptionnellement élevé.

1.2.1. Données relatives à la voie portée

Les caractéristiques fonctionnelles de la voie portée sont le tracé en plan, le profil en long et le profil en travers.

1.2.1.1. Le tracé en plan

Le tracé en plan est la ligne définissant la géométrie de l'axe de la voie portée, dessinée sur un plan de situation et repérée par les coordonnées de ses points caractéristiques. Cet axe a un caractère conventionnel : il n'est pas forcément l'axe de symétrie de la structure ou de la chaussée.

Dans toute la mesure du possible, il convient d'éviter les tracés en plan qui conduisent à des ouvrages courbes ou mécaniquement biais. Lorsque le tracé de la voie portée est biais géométriquement par rapport à l'obstacle franchi, il est généralement souhaitable de concevoir une structure mécaniquement droite, même au prix d'une légère augmentation de sa longueur droite. En effet, sauf dans le cas de structures simples de petite portée, le comportement mécanique des tabliers biais peut être éloigné de celui adopté dans les calculs, surtout lorsqu'il s'agit d'un ouvrage construit par phases. De même, il convient d'éviter, lorsqu'on le peut, les ponts courbes dont le mode de construction est beaucoup plus contraignant que celui des ponts droits et la géométrie difficile à maîtriser (notamment dans le cas de ponts construits en encorbellement).

1.2.1.2. Le profil en long

Le profil en long est la ligne située sur l'extrados de l'ouvrage (couche de roulement mise en œuvre) définissant, en élévation, le tracé en plan. Il doit être défini en tenant compte de nombreux paramètres liés aux contraintes fonctionnelles de l'obstacle franchi ou aux contraintes naturelles, et en fonction du type prévisible de l'ouvrage de franchissement.

En règle générale, il convient d'éviter les ouvrages plats et horizontaux, pour des raisons architecturales et d'écoulement des eaux pluviales. *A fortiori*, un profil en long en forme de cuvette doit être proscrit: un point bas au milieu d'un pont crée une impression particulièrement disgracieuse. Sur le plan esthétique, la géométrie du profil en long est souvent perçue à travers celle de la corniche (Chapitre 6) dont la qualité d'exécution doit être irréprochable. Il faut également éviter des profils en long présentant des discontinuités importantes de rayon de courbure et traiter les variations angulaires (par exemple entre une partie rectiligne et une partie courbe) à l'aide de courbes appelées clothoïdes¹.



Figure 1.3 – Profil en long disgracieux (photo SETRA).

1.2.1.3. Le profil en travers

Le profil en travers est l'ensemble des éléments qui définissent la géométrie et les équipements de la voie dans le sens transversal. Il doit être soigneusement étudié car il est très difficile de le modifier (par exemple, de l'élargir) si une telle possi-

1. Une clothoïde est une courbe dont la courbure ($1/R$) est proportionnelle à l'abscisse curviligne s , ce qui se traduit donc par l'équation générique $Rs = k$.

bilité n'a pas été prévue lors de la conception de l'ouvrage. Les questions relatives aux équipements d'un tablier de pont sont traitées au chapitre 6.

1.2.1.4. Les textes normatifs pour les ouvrages routiers

La définition des caractéristiques fonctionnelles d'un ouvrage n'est pas laissée à la libre imagination du projeteur. Un certain nombre de textes normatifs encadrent les possibilités de choix en fonction du statut et de la nature de la voie portée et, notamment, de la vitesse de référence des véhicules qui l'emprunteront. En ce qui concerne les ponts-routes, les différents textes sont les suivants :

- ARP (Aménagement des routes principales): ce texte s'applique aux routes bidirectionnelles, aux artères interurbaines à 2×2 voies et aux routes express à une chaussée. Pour ce qui concerne les routes nationales, la circulaire du 5 août 1994 (Chapitre 2) confère au document ARP le statut d'Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des routes nationales (ex-ICTARN);
- ICTAAL (Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison) pour les autoroutes et routes à 2×2 voies de type autoroutier en milieu interurbain;
- ICTAVRU (Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines) pour les voies rapides en milieu urbain.

D'une façon générale, les dispositions de nature législative sont fixées par la loi n° 89-413 du 22 juin 1989 relative au code de la voirie routière, complétée par le décret n° 89-631 du 4 septembre 1989. Ces textes sont applicables à l'ensemble des biens du domaine public de l'État, des départements et des communes affectés aux besoins de la circulation terrestre, à l'exception des voies ferrées. Les dispositions relatives aux chemins ruraux sont fixées par le Code rural (décret n° 69-897 du 18 septembre 1969).

En ce qui concerne les routes principales interurbaines, le document ARP en définit trois types appelés L (comme Liaison, type autoroutier), T (comme Transit, type route express à une chaussée) et R (comme Route).

La figure 1.4 et le tableau 1.I donnent des exemples de possibilités pour une chaussée bidirectionnelle sans bande cyclable.

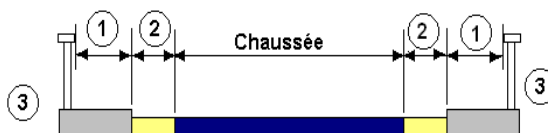


Figure 1.4 – Éléments du profil en travers routier.

1	Trottoir ou bute-roues
2	Bande dérasée
3	Dispositif de retenue

Tableau 1.1 – Exemples de profils en travers routiers.

Type de route		Chaussée	Bande dérasée de droite (BDD)	
			normale	minimale
R	Chaussée à 2 voies	7,00 m	2,00 m	1,75 m
R	Chaussées à 3 voies	10,50 m	2,00 m	1,75 m
T	Chaussées à 2 voies	7, 00 m	2,50 m	2,00 m
T	Chaussées à 3 voies	10 50 m	2,50 m	2,00 m

Pour les voies où la circulation piétonne est autorisée, (route non classée comme route express) les passages ou trottoirs doivent être d'une largeur au moins égale à 1 m; mais il est conseillé de porter cette dimension minimale à 1,25 m si le trottoir doit être assez fréquenté (Chapitre 6).

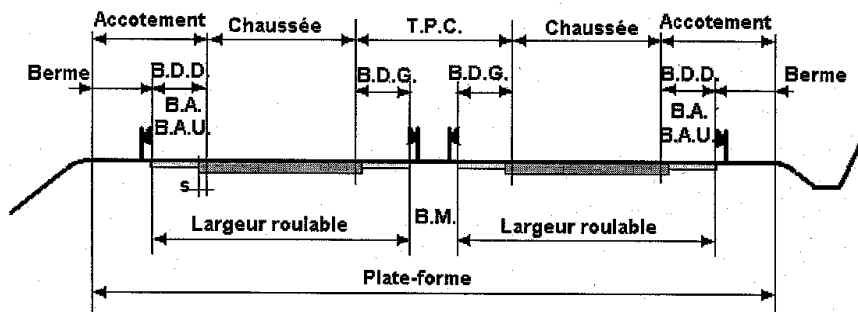
Le profil en travers est globalement caractérisé par sa largeur utile, comptée entre nus des dispositifs de retenue extrêmes. La chaussée proprement dite comporte, sur ses bords latéraux, des bandes dérasées.

En ce qui concerne les profils autoroutiers, les différents éléments du profil en travers en section courante (c'est-à-dire en dehors des ouvrages d'art) comprennent (Fig. 1.5):

- les chaussées, composées d'un nombre entier de voies de 3,50 m de largeur;
- le terre-plein central (TPC), se subdivisant en une bande médiane et deux bandes dérasées gauches (BDG);
- les accotements, comportant une bande d'arrêt d'urgence (BAU) ou une bande dérasée de droite (BDD) et une berme.

La largeur totale du terre-plein central est de 2,50 m en l'absence d'obstacle, 3 m en présence d'obstacle ponctuel (pile de passage supérieur) d'épaisseur inférieure ou égale à 0,50 m, 3,50 m en présence d'obstacle continu d'épaisseur inférieure ou égale à 0,50 m. Dans tous les cas, cette largeur doit être compatible avec le bon fonctionnement du dispositif de retenue prévu pour isoler l'obstacle et, sur des zones limitées de longueur comprise entre 2 km et 4 km, le TPC peut comporter des plantations et sa largeur est alors supérieure ou égale à 5 m. La largeur normale des bandes d'arrêt d'urgence est de 2,50 m pour un trafic de poids lourds inférieur à 1 500 véhicules/jour à la mise en service, 3 m dans le cas contraire. Dans le premier cas, il y a possibilité d'une réduction locale à 2 m.

Sur ouvrage d'art de moins de 100 m de longueur (cas des passages inférieurs courants), la largeur du terre-plein central en section courante est conservée. La largeur des bandes d'arrêt d'urgence est normalement de 2 m et la largeur courante des bandes dérasées gauches est de 1 m, mais elle peut être réduite en fonction du dispositif de retenue.



- BA bande d'arrêt
- BAU bande d'arrêt d'urgence (statut autoroutier)
- BDD bande dérasée de droite
- BDG bande dérasée de gauche
- s surlargeur portant le marquage routier de rive
- TPC terre-plein central
- BM bande médiane

Figure 1.5 – Éléments du profil en travers autoroutier en section courante.

Si l'ouvrage est bordé de barrières de sécurité non précédées par une glissière (Chapitre 6), il n'y a pas de passage de service. Si l'on prévoit, de chaque côté, un passage de service encadré par un garde-corps ou une barrière et une glissière qui les précède, la largeur de ce passage de service est de 1 m, comptée entre nus avant des dispositifs de retenue. Si l'ouvrage est bordé par de simples garde-corps sans glissière, le passage de service, de 1 m de largeur, est surélevé de 5 cm par rapport à la chaussée.

Si le profil en travers est réduit en section courante, on peut également disposer un profil en travers réduit sur ouvrage d'art. La largeur du TPC est alors ramenée à 1,50 m en l'absence d'obstacle, 2,50 m en présence d'un obstacle d'épaisseur inférieure ou égale à 0,50 m, et 3 m en présence d'obstacle continu de largeur inférieure ou égale à 0,50 m. La bande d'arrêt d'urgence est réduite à 2 m ou remplacée par une bande dérasée droite de largeur supérieure ou égale à 50 cm (largeur conseillée comprise entre 1 m et 2 m pour éviter que les usagers ne la confondent avec une bande d'arrêt d'urgence).

Dans le cas des grands ouvrages de longueur supérieure à 100 m, le projeteur a le choix, selon le profil en travers en section courante, entre des profils normaux et des profils réduits. Les diverses possibilités de profil en travers sont résumées dans le tableau 1.II.

Tableau 1.II – Profils en travers routiers et autoroutiers sur grands ouvrages.

Type d'autoroute	Deux tabliers séparés	Tablier unique
2 × 2 voies, trafic normal	BAU: 3 m Chaussée: 7 m BDG: 1 m Total: 11 m pour chaque tablier	BAU: 2 × 3 m Chaussées: 2 × 7 m TPC: 2,50 m Total: 22,50 m
2 × 2 voies, trafic faible	BDD: 1,25 m Chaussée: 7 m BDG: 0,50 m Total: 8,75 m pour chaque tablier	BDD: 2 × 1,25 m Chaussées: 2 × 7 m TPC: 1,50 m Total: 18 m
2 × 2 voies, trafic normal et profil réduit	BAU: 2 m Chaussée: 7 m BDG: 0,75 m Total: 9,75 m pour chaque tablier	BAU: 2 × 2 m Chaussées: 2 × 7 m TPC: 2 m Total: 20 m
2 × 3 voies	BAU: 3 m Chaussée: 10,50 m BDG: 0,50 m Total: 14 m pour chaque tablier	BAU: 2 × 3 m Chaussées: 2 × 10,50 m TPC: 1,50 m Total: 28,50 m

Ces dispositions ont été fixées par la circulaire de la direction des Routes du ministère de l'Équipement du 29 août 1991.

Les profils en travers à deux tabliers séparés ne conduisent généralement pas à un système d'appuis et de fondations économiques et doivent, en principe, être évités: les profils normaux ou réduits à tablier unique conduisent à des largeurs de chaussées que l'on installe facilement sur le hourdis supérieur d'une poutre-caisson (Fig. 1.6).

En ce qui concerne les autoroutes urbaines, l'ICTAVRU donne les possibilités de choix analogues à celles de l'ICTAAL, mais plus adaptées à la solution de problèmes liés à la circulation urbaine.

Lorsque des pistes cyclables sont prévues, il est recommandé de prévoir:

- une largeur normale de 2 m pour les pistes unidirectionnelles, avec des surlargeurs de 0,20 m s'il y a lieu de prendre en compte des effets de paroi ou d'abîme,
- une largeur minimale de 3 m pour les pistes bidirectionnelles.

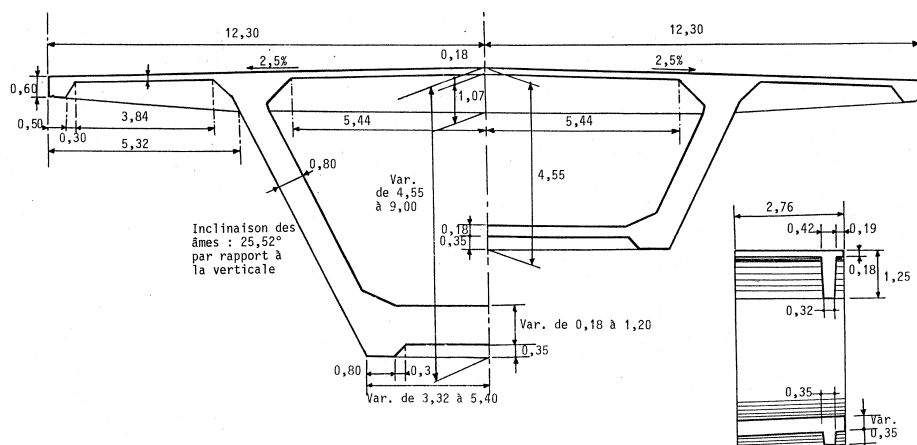


Figure 1.6 – Le pont de Cheviret: un exemple de profil en travers très large.

À titre d'information, les caractéristiques fonctionnelles des ouvrages ferroviaires sont fixées par la SNCF dans diverses notices constituant son Cahier des prescriptions communes (CPC). Les notices les plus importantes sont les suivantes :

- NG EF 1 C3, relative aux gabarits (fascicule n° 1 : implantation des obstacles; fascicule n° 2 : transports exceptionnels; fascicule n° 3 : gabarits d'isolement des pantographes);
- NG EF 2 C32 n° 2, relative aux profils en travers types.

Elles sont complétées par des documents techniques comme les documents EF7B (signaux) et EF9B (installation de traction électrique).

Pour l'établissement des projets d'ouvrages d'art neufs, une liste (non exhaustive) de renseignements nécessaires à l'étude est proposée :

- pour un pont sur une ligne existante, dans la notice IG EF 1 G2 n° 1 ;
- pour un pont sur une ligne nouvelle, dans la « Procédure de collecte des éléments de programme du manuel Qualité du département VO ».

Mais, dans la pratique, un projet débute toujours par une prise de contact avec le service compétent de la SNCF, sachant que les règles de répartition de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre pour des opérations de construction de ponts-routes au-dessus de voies ferrées sont données dans l'instruction générale IG EF 1 GE n° 1.

1.2.2. Données relatives à l'obstacle franchi

Lorsque l'ouvrage projeté franchit une voie de communication (route, voie ferrée ou voie navigable), il convient de respecter les caractéristiques fonctionnelles relatives à cette voie. Dans la plupart des cas, il s'agit de respecter certaines hauteurs libres et certaines ouvertures.

1.2.2.1. Gabarits et hauteurs libres pour les ouvrages routiers

Le *gabarit* est une grandeur associée au véhicule routier: elle caractérise sa hauteur statique maximale, chargement compris, dont le passage peut être accepté, dans des conditions normales de circulation, sous un ouvrage. Cette notion ne doit pas être confondue avec celle de hauteur libre (ou tirant d'air), associée à l'ouvrage, qui représente la distance minimale entre tout point de la partie roulable de la plate-forme et de la sous-face de l'ouvrage (Fig. 1.7) ou, le cas échéant, de la partie inférieure des équipements que supporte cette sous-face. La directive européenne ECC/85/3 modifiée par la directive EEC/86/360 fixe les caractéristiques des véhicules lourds pouvant circuler librement sur le réseau routier européen. Le gabarit maximal des véhicules est fixé à 4,00 m et le véhicule le plus lourd pèse 440 kN. Mais il y a parfois des différences significatives entre la théorie et la réalité !

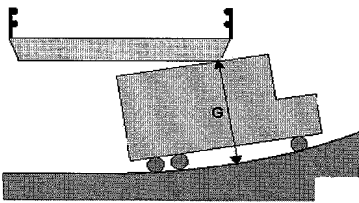


Figure 1.7 – Gabarit et hauteur libre ne se mesurent pas que selon la direction verticale.

La hauteur libre minimale sous ouvrage d'art est:

- 4,30 m sur l'ensemble du réseau routier national, départemental et communal;
- 4,50 m sur les grandes routes de trafic international décrites dans l'accord de Genève du 15 novembre 1975 (AGR) et précisées par décision ministérielle;
- 4,75 m sur les autoroutes.

Dans certains cas particuliers, cette hauteur libre minimale peut être réduite à 4,50 m sur autoroute lorsque le contexte technico-économique le justifie. Mais, en règle générale, il convient de l'harmoniser avec celle des ouvrages existant dans le maillage routier auquel appartient le nouvel ouvrage. De plus, à la construction, une revanche de 10 cm doit être ajoutée à ces valeurs pour tenir compte d'inévitables renforcements ultérieurs de la chaussée franchie et de possibles tassements des appuis de l'ouvrage à construire.

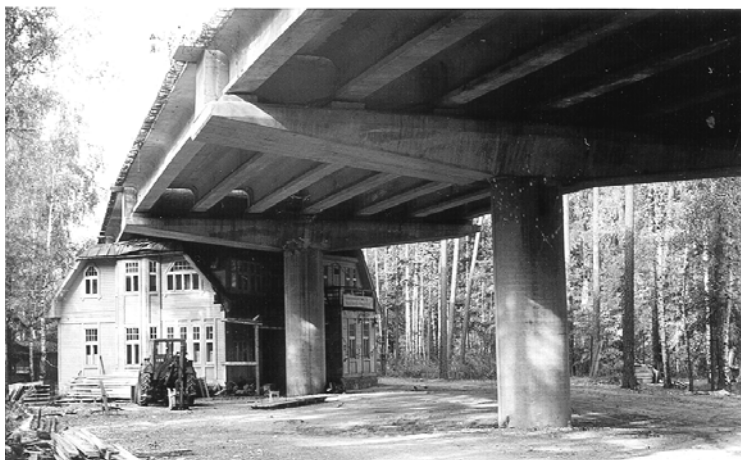


Figure 1.8 – Une méthode bien curieuse pour réduire le gabarit d'habitations (photo JAC).

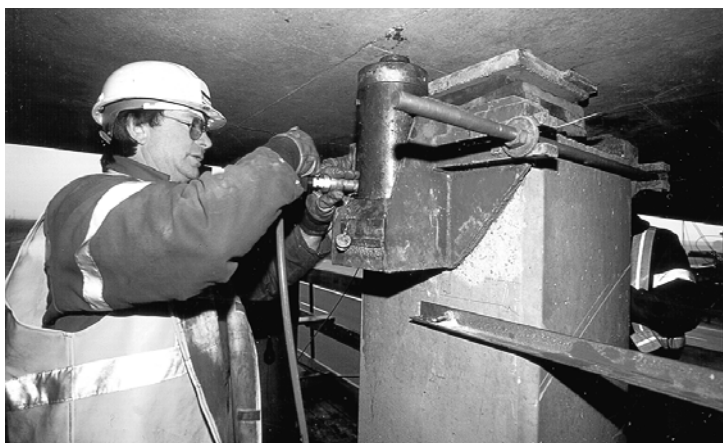


Figure 1.9 – Opération de relevage d'un tablier qui n'offrirait plus une hauteur libre suffisante (photo Freyssinet Int.).

Dans le cas de passerelles pour piétons ou cyclistes, il est prudent d'augmenter ces gabarits de 0,50 m car les passerelles sont souvent assez légères et donc beaucoup plus sensibles à un choc de véhicule hors gabarit (Fig. 1.10). Enfin, au droit des trottoirs et des pistes cyclables, une hauteur minimale de l'ordre de 2 m doit être respectée.

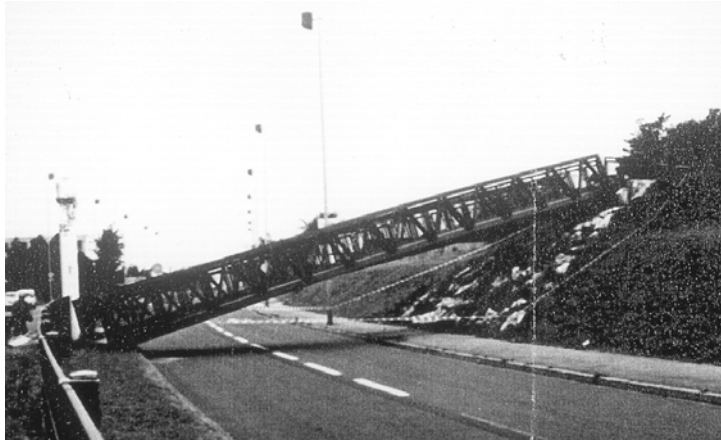


Figure 1.10 – Passerelle emportée par un véhicule hors gabarit (photo J.-F. Fontaine).

Dans le cas des ouvrages routiers sur voies ferrées, voir § 1.2.1.4.

Enfin, dans le cas d'ouvrages franchissant des voies navigables, ce sont les services intéressés de la Navigation qui définissent les gabarits à respecter. Généralement, ils se présentent sous la forme d'un rectangle tracé au-dessus des plus hautes eaux navigables (PHEN), dont les dimensions sont très variables selon la nature de la voie et du trafic qui l'emprunte, et à l'intérieur duquel il est interdit d'implanter un appui.

Signalons en dernier lieu qu'en cours de construction il convient souvent de respecter les gabarits définis pour la situation de l'ouvrage en service; mais, dans certains cas, on peut admettre des gabarits réduits si la phase de construction est de durée relativement courte.

1.2.2.2. Ouvertures des ouvrages routiers

La notion d'ouverture ne concerne, en fait, que les franchissements de voies routières. Pour toute voie routière passant sous un pont, on caractérise son profil en travers par l'ouverture utile droite comptée entre nus intérieurs des appuis de l'ouvrage qui l'encadrent. Les textes normatifs prévoient certaines dispositions, mais le problème des ouvertures fait intervenir d'autres critères d'appréciation comme, par exemple, la visibilité du tracé routier de la voie franchie.

1.3. LES DONNÉES NATURELLES

1.3.1. Les données géotechniques

Les données géotechniques sont évidemment fondamentales dans l'étude d'un ouvrage. Non seulement elles déterminent le type de fondation des appuis, mais elles constituent l'un des éléments du choix de la solution pour le franchissement projeté. Elles sont obtenues à partir d'une reconnaissance qui doit donner les informations désirées sur le terrain naturel, le niveau de la nappe (au sens le plus général) et le (ou les) niveau(x) possible(s) de fondation.

En ce qui concerne le terrain naturel, le projeteur doit, bien évidemment, connaître avec précision sa topographie afin d'implanter correctement l'ouvrage, estimer les mouvements de terres et choisir les emplacements les plus adéquats pour les installations de chantier, les accès aux différentes parties de l'ouvrage et les aires de préfabrication éventuelles.

La connaissance du niveau de la nappe est un des éléments qui lui permettra de choisir le type d'ouvrage et de fondation des appuis, ainsi que les procédés d'exécution de ces fondations.

Enfin, la reconnaissance géotechnique doit donner des indications quantitatives sur la nature des terrains rencontrés :

- paramètres mécaniques de résistance (pour les problèmes de capacité portante);
- paramètres rhéologiques (pour les problèmes de tassement et de fluage);
- compacité (pour les problèmes de terrassements);
- perméabilité (pour les problèmes d'épuisements ou de bétonnage dans les fouilles).

Dans le cas des ouvrages en site montagneux, la reconnaissance doit permettre de connaître les zones instables éventuelles, les failles et les diaclases de la matrice rocheuse et, si possible, les cheminements d'eau préférentiels qui constituent l'un des principaux facteurs d'instabilité des couches d'éboulis.

1.3.2. Les données hydrauliques

Lorsqu'un ouvrage franchit un cours d'eau ou un canal, un certain nombre de renseignements sont nécessaires. En dehors du relevé précis de la topographie du lit, il convient de connaître les niveaux de l'eau qui influent sur la conception générale du franchissement et son implantation dans l'espace, et permet d'apprécier l'opportunité de certaines méthodes d'exécution. Les principaux renseignements sont les niveaux correspondant aux PHEC (plus hautes eaux connues), PHEN (plus hautes eaux navigables) et PBE (plus basses eaux ou étiage).

Le niveau des PHEC permet de caler le profil en long de l'ouvrage. En effet, il est d'usage de dessiner un pont en plaçant ses appareils d'appui au-dessus de cette cote pour éviter leur détérioration à la suite d'immersions trop fréquentes. Certains ingénieurs les placent systématiquement à 1 m au-dessus de la cote des PHEC, mais cette disposition peut, dans certains cas, s'avérer trop conservatrice.

En fait, le problème hydraulique doit être considéré à une plus large échelle. L'ouvrage projeté ne doit pas provoquer, par des remblais d'accès trop rapprochés, une réduction inacceptable du débouché hydraulique du cours d'eau. Par ailleurs, il convient de s'assurer de la réalité physique de la cote supposée des PHEC. Très souvent, cette cote se réfère à des crues qui se sont produites au siècle dernier. Or, en l'espace d'un siècle, le régime hydraulique du cours d'eau a probablement évolué à la suite de certains aménagements (barrages, endiguements, rectifications de cours d'eau, etc.) ou de conditions de gestion particulières (extractions massives de matériaux ayant entraîné un abaissement graduel du lit).

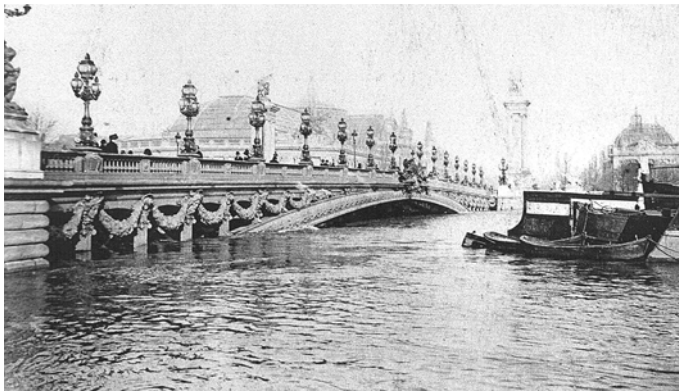


Figure 1.11 – Crue de la Seine à Paris en 1910 au droit du pont Alexandre III (photo DR).

À l'inverse, la connaissance de l'étiage et de ses périodes permet d'organiser le déroulement des travaux de façon que les fondations soient exécutées dans les meilleures conditions possibles.

La connaissance des niveaux de l'eau n'est généralement pas suffisante. Certaines données purement hydrauliques peuvent être indispensables pour aborder l'étude d'un phénomène, correspondant à un danger réel pour les ponts, qui est le phénomène d'affouillement. Ce problème est suffisamment important et mal connu pour que des indications assez détaillées soient données au chapitre 3.

1.4. INSERTION DES OUVRAGES D'ART DANS LEUR ENVIRONNEMENT

Il ne serait pas normal, dans un chapitre consacré aux données de base d'un projet de pont, de ne pas aborder la question de l'insertion des ouvrages dans leur environnement. L'ingénieur ne doit pas être seulement un froid technicien cherchant la solution la plus économique pour résoudre un problème d'aménagement donné: il se doit de répondre aux attentes de la société tant en matière paysagère qu'en matière de respect de l'environnement.

1.4.1. Le cadre législatif et réglementaire

Les premiers fondements législatifs de la protection de l'environnement en France sont relativement anciens mais ils ont été pendant longtemps partiels ou sectoriels. C'est ainsi que la protection des monuments historiques et des sites repose sur des législations de 1913 et 1930, celle du patrimoine archéologique sur une loi de 1943. Il s'est ajouté en 1964 une loi sur l'eau; la panoplie des textes s'est ainsi développée progressivement.

En matière de projets routiers, les textes de base fixant la politique globale de protection de l'environnement sont les suivants:

- la loi n° 76.629 du 10 juillet 1976 dite « loi de protection de la nature », notamment les articles 1 et 2 et le décret n° 77-1141 du 12 octobre 1977 modifié par le décret n° 93-245 du 25 février 1993;
- la loi n° 83-630 du 12 juillet 1983 relative à la démocratisation des enquêtes publiques, dite loi « Bouchardeau », associée au décret n° 85-453 du 23 avril 1985.

Ces textes introduisent deux grands principes:

- la protection des espaces naturels et des paysages, la préservation des espèces animales et végétales, le maintien des équilibres biologiques et la protection des ressources biologiques sont déclarés d'intérêt général;
- préalablement à la réalisation de certaines études d'aménagements ou d'ouvrages susceptibles de porter atteinte au milieu naturel, une étude d'impact doit être produite pour permettre d'en apprécier les conséquences. Le décret n° 77-1141 du 12 octobre 1977 sur les études d'impact pris en application de la loi de protection de la nature précise leur contenu mais aussi les projets qui en sont dispensés.

Dans le domaine des opérations routières, cette préoccupation s'est traduite, au fil des ans, par la mise en place d'un véritable processus d'études d'environnement réalisées tout au long de la démarche d'établissement des projets. Les études d'environnement prennent place dans les dossiers successifs correspondant à chaque

étape de l'étude. Mais, au-delà des études et des dossiers, la prise en compte effective de l'environnement constitue l'objectif à atteindre, depuis la conception jusqu'à la gestion correcte des infrastructures.

La directive CEE n°85-337 du Conseil des Communautés européennes du 27 juin 1985 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics ou privés sur l'environnement, entrée en application obligatoire depuis le 3 juillet 1988, est compatible avec le système déjà en place en France. Elle introduit pourtant une obligation supplémentaire sur « la nécessité de tenir compte le plus tôt possible des incidences sur l'environnement de tous les processus de planification et de décision ». Cette démarche pourrait intervenir dès le niveau du jugement d'opportunité et rendrait à ce stade obligatoire la fourniture d'études, d'information et la consultation du public.

Plusieurs textes furent ensuite publiés au niveau national :

- le décret n° 93-245 du 25 février 1993 et la circulaire n° 93-73 du 27 septembre 1993, relatifs aux études d'impact;
- la loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement.

Dans le domaine routier, les textes principaux sont les suivants :

- loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982 « Loi d'orientation des transports intérieurs » (LOTI);
- décret n° 84-617 du 17 juillet 1984 relatif à l'application de l'article 14 de la LOTI;
- instructions du 14 mars 1986 relatives aux méthodes d'évaluation des investissements routiers en rase campagne et zones urbaines, modifiées par la circulaire du 28 juillet 1995;
- circulaire du 22 mai 1987 sur l'Instruction mixte;
- circulaire du 27 octobre 1987 relative aux autoroutes concédées;
- instruction du 7 juin 1990 relative aux conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines (ICTAVRU, cf. Chapitre 2);
- circulaires du 15 novembre 1991 relatives aux APSI et aux DVA (cf. Chapitre 2);
- circulaire n° 92-71 du 15 décembre 1992 du ministère de l'Équipement sur la conduite des grands projets nationaux d'infrastructure, qui organise « un débat transparent et démocratique »;
- circulaire du 5 mai 1994 relative aux opérations d'investissement sur le réseau routier national non concédé (cf. Chapitre 2);
- circulaire n° 96-21 du 11 mars 1996 du ministère de l'Équipement relative à la prise en compte de l'environnement et du paysage dans les projets routiers;

- circulaire du 12 décembre 1997 du ministère de l'Équipement relative à la prise en compte du bruit dans la construction des routes nouvelles ou l'aménagement des routes existantes du réseau national.

Une première phase de débat doit être organisée dès la conception du projet et en amont des études de tracé: elle permet aux élus, aux forces sociales, économiques, associatives, au public de s'informer et de débattre des enjeux économiques, sociaux et environnementaux du projet.

Après la déclaration d'utilité publique, la liste des engagements de l'État en matière d'insertion économique, sociale et de protection des espaces doit être rendue publique, afin d'en permettre le suivi. Un bilan économique, social et environnemental du projet doit être établi par le maître d'ouvrage dans les années qui suivent la mise en service de l'infrastructure.

1.4.2. Ouvrages d'art et environnement

Si l'intégration paysagère et architecturale des ouvrages d'art est actuellement correctement prise en compte (cf. § 1.4.3), des progrès sont encore attendus en matière de préservation du milieu naturel et de l'environnement au sens large. Certes, les ouvrages sont nettement moins concernés par ce type de préoccupation que les projets routiers proprement dits, mais les chantiers sont toujours une source de nuisances et il ne faut pas perdre de vue que des impacts peuvent se révéler très loin du strict périmètre d'une opération.

De manière générale, l'étude d'impact doit présenter:

- 1) une analyse de l'état initial du site et de son environnement portant sur les richesses naturelles et les espaces naturels agricoles, forestiers, maritimes ou de loisirs affectés au projet;
- 2) une analyse des effets sur l'environnement et, en particulier, sur les sites et paysages, la faune, la flore, les milieux naturels et équilibres biologiques et, le cas échéant, sur la commodité du voisinage (bruit) ou sur l'hygiène et la salubrité publique;
- 3) les raisons pour lesquelles, notamment du point de vue de l'environnement, le projet présenté a été retenu;
- 4) les mesures envisagées par le maître d'ouvrage pour supprimer, réduire et compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement ainsi que l'estimation des dépenses correspondantes.

L'attention des projeteurs est particulièrement attirée sur les points suivants:

- utilisation optimale des ressources naturelles;
- préservation des aquifères et milieux aquatiques;
- conservation de la dynamique fluviale;

– sauvegarde de la faune et de la flore.

En ce qui concerne l'utilisation optimale des ressources naturelles, la réalisation d'ouvrages d'art nécessite l'emploi de matériaux nobles (aciers, granulats de qualité, etc.) et de matériaux plus courants (matériaux de remblais, eau de gâchage, etc.). L'ingénieur doit se souvenir que la production des matériaux nobles peut avoir de lourdes conséquences environnementales (par exemple, extraction de sables de qualité dans le lit mineur d'une rivière, engendrant des risques d'affouillement général autour des piles des ponts existants) et il doit s'interroger en permanence sur l'adéquation entre la qualité requise des matériaux et leur destination réelle.

L'eau est la base de notre environnement. C'est par elle que la nature existe, mais c'est aussi par elle que la pollution se propage. La prise de conscience de la nécessité de protéger les ressources hydrauliques, notamment après plusieurs périodes de sécheresse relativement récentes, a fait de la protection des eaux la plus grande priorité de la protection de l'environnement.

Les projets routiers induisent trois types de perturbations :

- la modification des écoulements en surface et sous terre ;
- la pollution des eaux ruisselant sur la chaussée ;
- un risque de pollution accidentelle.

La prise en compte des contraintes d'environnement doit se faire impérativement dès les études préliminaires de tracé routier pour l'éloigner des zones sensibles à la pollution.

Pour les ouvrages implantés en partie supérieure des cours d'eau, il ne faut pas oublier que la tête de bassin est un ensemble de zones humides conditionnant la qualité et les débits de la ressource aval. Grands et petits ouvrages doivent être conçus et dimensionnés pour permettre la libre circulation de la faune aquatique, notamment en période d'étiage.

Lorsqu'un ouvrage doit franchir un fleuve, il faut toujours étudier des solutions évitant l'implantation d'appuis dans le lit majeur. Dans tous les cas, les fondations doivent être suffisamment profondes pour éviter les conséquences des affouillements (Chapitre 3). La consolidation végétale de berges est à privilégier car elle permet la reconstitution de la forêt alluviale et de sites de reproduction pour les poissons et invertébrés notamment.

La faune et la flore sont deux éléments tangibles de notre environnement, résultat et partie d'un équilibre écologique parfois fragile. Réaliser un projet routier qui va perturber le fonctionnement naturel du biotope (aire géographique correspondant à un groupement d'êtres vivants soumis à des conditions dont les dominantes sont

homogènes) sans s'inquiéter de l'impact à court, moyen ou long terme de ces bouleversements, peut avoir des conséquences très dommageables sur celui-ci.

Ainsi, un tracé routier peut totalement isoler une espèce de batraciens de son lieu unique et presque « génétique » de ponte. Il peut aussi couper un axe de déplacement de grands cervidés. La nature d'un remblai peut modifier le PH du sol et ainsi faire disparaître totalement une plante rare qui pouvait constituer un élément essentiel de l'alimentation de tel animal ou insecte. Les exemples ne manquent pas.

Prendre en compte la faune et la flore dans un projet routier ne permettra peut-être pas de conserver le biotope existant. L'objectif principal est de donner au milieu naturel toutes les chances d'évoluer vers une nouvelle situation qui préservera le mieux possible son intégrité.

Des inventaires nationaux (ZNIEFF, zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique, ZICO, zones importantes pour la conservation des oiseaux) ou européens (réseau NATURA 2000 en cours d'élaboration) permettent de connaître la sensibilité potentielle des lieux d'implantation des ouvrages.

Enfin, on ne saurait trop insister sur la nécessité de limiter les nuisances, qu'il s'agisse des nuisances inévitables en cours d'exécution (bruits, chaussées salies, vibrations pouvant endommager des constructions avoisinantes, etc.) ou des nuisances apportées par l'ouvrage une fois mis en service. Si les riverains acceptent assez facilement les premières, dans certaines limites, ils ne tolèrent pratiquement pas les secondes, notamment le bruit.

C'est pourquoi, il est très fréquent de disposer, sur les ouvrages en site urbain ou suburbain, des équipements de type écrans antibruit ou anti-vent en bordure des tabliers de ponts. Outre le fait qu'ils sont onéreux (à la fois en coût initial et en entretien), ils apportent des charges supplémentaires à la structure porteuse, dont la conception et le dimensionnement peuvent être sensiblement affectés.

1.4.3. Intégration paysagère et architecturale des ponts

Bien que les considérations d'ordre esthétique soient très subjectives, un projeteur de pont ne peut ignorer l'impact visuel de son ouvrage. La question se pose avec acuité en site urbain, mais, même en rase campagne, il n'est pas admissible de défigurer le paysage par un ouvrage laid. À l'inverse, on peut même dire qu'un ouvrage réussi sur le plan architectural contribue, dans certains cas, à l'épanouissement touristique de la zone dans laquelle il est implanté.

C'est pourquoi, il est d'usage de faire intervenir un architecte compétent, c'est-à-dire ayant une expérience en matière d'ouvrages d'art, dès le stade des études préliminaires ; cet architecte pourra, par sa perception des volumes et ses connais-

sances relatives à l'impact visuel de certains détails, améliorer l'aspect d'ensemble du pont.

La puissance publique a voulu mettre l'accent sur l'importance avec laquelle il y a lieu de considérer les problèmes d'insertion dans le site d'un ouvrage d'art en élaborant une circulaire ministérielle en date du 23 janvier 1978 (circulaire n° 78-16) relative à la méthodologie applicable pour l'établissement des dossiers d'études d'impact en matière de projets routiers. Selon cette circulaire, tout projet routier de quelque importance doit donner lieu à une étude d'impact qui présente successivement :

- une analyse de l'état initial du site et de son environnement ;
- une analyse des effets, sur l'environnement (sites, paysages, faune, flore, etc.) de l'opération envisagée ;
- les raisons pour lesquelles, parmi les partis envisagés, le projet présenté a été retenu ;
- les mesures envisagées pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement, ainsi que l'estimation des dépenses correspondantes.

La direction des Routes du ministère de l'Équipement émit une circulaire, en date du 24 septembre 1984, relative à la qualité paysagère et architecturale des ouvrages routiers. Cette circulaire détaillait un certain nombre de principes dont la mise en œuvre devait naturellement s'intégrer dans le processus d'élaboration des projets routiers. Elle fut suivie par une lettre-circulaire ministérielle, en date du 21 novembre 1989, relative à la qualité des études des ouvrages d'art (*Bulletin officiel* n° 91-2), rappelant que le concepteur d'un pont était un ingénieur, et non pas un architecte. Cependant, la circulaire du 5 mai 1994 (cf. Chapitre 2) définit de façon claire le cadre d'intervention de l'architecte en matière d'ouvrages d'art.

1.5. LA DURABILITÉ DES CONSTRUCTIONS

La préoccupation principale, et quasi-exclusive, des ingénieurs est, de tous temps, la tenue des ouvrages aux efforts de diverses origines qu'ils sont amenés à subir. Mais, par le passé, leur tenue aux influences d'un environnement parfois hostile n'était pas spécialement étudiée ; les codes de conception et de calcul étaient censés avoir tenu compte de ces influences, et la notion de durée de vie était rarement mentionnée dans les appels d'offres. C'est dans cet esprit que, par exemple, la fissuration du béton n'était presque uniquement étudiée qu'en vue de limiter l'ouverture des fissures d'origine mécanique, en « oubliant » trop facilement les fissures, pourtant les plus fréquentes, puisque les ouvrages étaient bien calculés, d'origine non structurale (celles de contraction thermique contrariée par exemple), fissures génératrices de dégradations à long terme.

Depuis quelques décennies, des travaux fondamentaux ont permis de mieux approcher les questions de durabilité. Dans le domaine des constructions en béton, citons les remarquables bulletins d'information n°183 « Durable concrete structures » et n° 238 « New approach to durability design » édités respectivement en mai 1983 et mai 1997 par le Comité euro-international du béton.

Le système des Eurocodes, dont la mise en application est prévue au cours des toutes prochaines années (Chapitre 5) fait une plus large part aux questions de durabilité que les textes nationaux actuels. Il suppose que la durabilité de tout ou partie d'une structure dans son environnement est telle qu'elle reste apte à son utilisation prévue pendant toute la durée d'utilisation de projet, moyennant une maintenance appropriée, c'est-à-dire sans entretien excessif imprévu. Il est même stipulé: « Il convient que la structure soit conçue de sorte que sa détérioration ne nuise pas à sa durabilité et à ses performances, le niveau de maintenance prévu étant dûment pris en compte. »

Pour assurer une durabilité adéquate de la structure, il faut prendre en compte les facteurs interdépendants suivants:

- son utilisation prévue et, éventuellement, une utilisation future différente;
- les critères de performance requis;
- les influences escomptées de l'environnement, c'est-à-dire l'ensemble des actions chimiques et physiques auxquelles sont soumis la structure globale ainsi que ses éléments constitutifs, et dont les effets ne sont pas inclus dans les hypothèses de charge considérées lors du calcul structural;
- la composition, les propriétés et les performances des matériaux;
- le choix du système structural;
- la forme des éléments structuraux et les dispositions constructives;
- la qualité de la mise en œuvre et le niveau de contrôle;
- les mesures de protection spécifiques;
- la maintenance pendant la durée de vie escomptée.

1.5.1. Durabilité des constructions en béton

C'est à l'occasion de la construction du pont Vasco de Gama sur le Tage à Lisbonne (1995-1998) que furent quantifiées, pour la première fois pour un tablier de pont en béton, des exigences de durabilité. S'agissant d'un ouvrage exceptionnel de 12,23 km de longueur totale composé de quatre viaducs et d'un pont à haubans, il était spécifié, dans le cahier des charges, une durée de vie de 120 ans pour le béton, définie comme le temps nécessaire à l'amorçage de la corrosion des aciers, c'est-à-dire à l'atteinte d'un seuil de concentration des ions chlore au niveau des armatures. Pour pouvoir répondre à cette exigence, des études poussées

furent conduites pour aboutir à une formulation de béton à hautes performances sur la base d'indicateurs de durabilité rigoureusement sélectionnés (perméabilité, coefficients de diffusion des ions chlore, profondeur de carbonatation, porosité accessible à l'eau). Naturellement, les différents phénomènes physico-chimiques correspondant aux indicateurs de durabilité furent l'objet de simulations sur la base des valeurs mesurées à différentes échéances jusqu'à 18 mois.

Les questions de durabilité des constructions en béton sont l'objet de débats et de recherches à l'heure actuelle. Il ne semble donc pas inutile de leur consacrer les quelques développements qui suivent.

1.5.1.1. La passivation des armatures

La prise du béton est obtenue par hydratation de silicates et d'aluminates de calcium et d'autres composants rendus anhydres par chauffage, puis pulvérisés; le ciment exige pour que cette réaction d'hydratation se produise, environ 26 % de son poids d'eau. Or, un béton normal mis en œuvre pour la construction d'ouvrages de bâtiment ou de génie civil contient beaucoup plus d'eau: le rapport en poids E/C de l'eau par rapport au ciment est de l'ordre de 0,50; il descend rarement en dessous de 0,40, sauf à recourir à l'emploi d'adjuvants particuliers. Il en résulte qu'après prise et durcissement, le béton contient une quantité non négligeable d'eau libre, de l'ordre de 50 à 100 litres par mètre cube. On pourrait croire que l'acier des armatures est ainsi exposé à l'oxydation, et se transforme en rouille; il n'en est rien, en raison de la forte alcalinité de la pâte du ciment, dont le pH est voisin de 13. Ce fait est dû principalement à la présence de chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en solution. H. Pourbaix a montré en effet que la corrosion du fer ou de l'acier était rendue impossible par une telle valeur du pH, par suite de la formation d'une couche d'oxyde passivante en surface. C'est donc ce mariage heureux du fer et du ciment qui a permis le succès des constructions en béton.

1.5.1.2. Théorie classique de la fissuration du béton

Le postulat admis pendant plus de cinquante ans par les spécialistes du béton armé s'énonce ainsi: « Les armatures étant protégées par l'alcalinité de la pâte du ciment, leur oxydation ne peut intervenir que par leur contact direct avec le milieu ambiant à la faveur de l'ouverture des fissures ». Ce postulat admet un corollaire: « L'oxydation des armatures est d'autant plus rapide que les fissures du béton sont plus largement ouvertes ». Or il se trouve qu'à l'état normal, le béton est fissuré, ainsi que le montre un calcul élémentaire:

- même dans les classes d'environnement les plus sévères, la contrainte de traction des armatures en service est habituellement d'environ 200 MPa;
- le module élastique de l'acier est égal à 210000 MPa; l'allongement de l'acier tendu est donc de l'ordre de 10^{-3} ;

– par le jeu de l'adhérence, le béton subit un allongement égal à celui de l'acier; son module élastique est variable avec la durée des sollicitations qui lui sont appliquées, mais on peut admettre une valeur moyenne de 30000 MPa; l'allongement de 10^{-3} calculé pour l'acier correspondrait ainsi à une contrainte de traction de 30 MPa, soit environ 10 fois plus que sa résistance à la traction.

La fissuration du béton est donc inéluctable sous les charges de service.

Ce fait étant admis, les concepteurs et les rédacteurs des codes se sont efforcés de limiter l'ouverture des fissures dans les constructions en béton armé en service. Dans ce but, ils ont étudié le mécanisme de la fissuration, et montré que la largeur des fissures était d'autant plus faible que le diamètre des barres était plus petit. La théorie de L.-P. Brice, qui figure en annexe des Règles CCBA 60 et CCBA 68, en donne une démonstration aujourd'hui classique, partant de l'hypothèse que la contrainte d'adhérence entre le béton et l'acier est constante. Des formules ont été développées, reliant l'ouverture « moyenne probable » des fissures à différents paramètres tels que :

- la rugosité de la surface des barres;
- la résistance du béton à la traction;
- le diamètre des barres;
- le pourcentage d'acier dans la section du béton tendu;
- la contrainte des aciers en service.

Ces formules, pour les règles françaises et antérieures aux règles BAEL, entraînaient une limitation assez stricte de la contrainte des aciers, définie en vue de limiter la largeur des fissures. Les règles CCBA 60 considéraient trois cas, avec trois valeurs différentes d'un coefficient entrant dans la formule définissant la contrainte admissible de l'acier :

- fissuration peu nuisible et ne compromettant ni la conservation des aciers, ni la durée de l'ouvrage;
- fissuration des zones tendues préjudiciable parce que les éléments sont exposés aux intempéries, à l'eau ou à une atmosphère agressive ou bien parce qu'ils doivent servir de support à un revêtement fragile;
- ouverture des fissures très préjudiciable parce que les éléments considérés sont en contact avec l'eau ou exposés à un milieu particulièrement agressif ou bien parce qu'ils doivent assurer une étanchéité.

Les règles CCBA 68 n'apportèrent que des changements mineurs à cette classification: dans la définition des cas, le qualificatif « agressif » de l'atmosphère s'appliquait au cas de fissuration très préjudiciable, et non plus de fissuration préjudiciable.

Dans l'esprit des rédacteurs des codes de 1960 et 1968, ces trois cas devaient correspondre à des ouvertures de fissures respectivement de l'ordre de 0,3 - 0,2 - 0,

1 mm, encore que ces valeurs dussent être accueillies avec précaution, les codes eux-mêmes exprimant de nombreuses réserves sur la précision à en attendre. Ces chiffres étaient confirmés par toute la littérature de l'époque et, en particulier, par le cours de béton armé de l'École nationale des ponts et chaussées dispensé, à l'époque, par le professeur J.-R. Robinson.

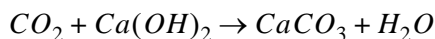
1.5.1.3. Fissuration et corrosion : l'expérience

Au cours des dernières décennies, de nombreuses expérimentations ont été conduites afin de mieux connaître l'influence de la fissuration sur la corrosion dans différentes conditions d'exposition; elles ont amené les spécialistes à infirmer la théorie classique. L'un des premiers fut P. Schiessl qui montra que la corrosion intervenait en deux phases successives: la première, qui aboutit à la dépassivation de l'acier, est d'autant plus rapide que les fissures sont plus ouvertes; la deuxième, oxydation, la plus importante, ne dépend pas de la largeur des fissures. Ces résultats furent confirmés en Angleterre par A. Beeby et, en France, par une étude pilotée par le ministère de la Recherche, l'AFREM et l'AFPC, qui n'a malheureusement pas été l'objet d'un rapport de synthèse publié.

Des essais en laboratoire, et de l'observation de très nombreux ouvrages en béton armé, ont pu se dégager les conclusions suivantes, admises aujourd'hui par la plupart des spécialistes:

- une fissuration fine, de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre, ne compromet pas la durabilité d'un ouvrage situé en atmosphère normale. Seules les fissures largement ouvertes (d'une largeur supérieure ou égale à 0,3 à 0,5 mm) peuvent constituer un danger;
- le principal facteur de la corrosion de l'acier est la perméabilité du béton qui l'entoure: la porosité du béton, plus que sa fissuration, est la cause première de la corrosion des armatures.

Comme nous l'avons dit plus haut, le béton contient une quantité notable d'eau libre qui, s'évaporant, autorise la pénétration d'agents extérieurs; le plus fréquent est le gaz carbonique qui s'allie avec la chaux libre suivant la réaction:



Il en résulte un abaissement du pH et une dépassivation de l'acier qui devient sensible à l'oxydation. Pour un béton courant, la profondeur de pénétration du gaz carbonique CO_2 croît sensiblement comme la racine carrée du temps, elle peut atteindre 15 à 20 mm en vingt ans. En atmosphère marine et, en particulier, pour les ouvrages exposés aux embruns, c'est la pénétration des chlorures qui est à redouter, car elle a pour effet de réduire le domaine d'immunité de l'acier, vis-à-vis de la corrosion, et de favoriser son oxydation. Ainsi, pour assurer la durabilité d'une construction en béton armé, il importe de placer les armatures hors d'atteinte des

agents agressifs en ménageant autour d'elle une épaisseur suffisante d'un béton compact. Les progrès réalisés depuis dix ans environ, grâce à l'emploi des fluidifiants réducteurs d'eau, sont significatifs à cet égard.

En résumé, on peut affirmer que pour un ouvrage bien conçu, et réalisé avec soin (en particulier en ce qui concerne l'épaisseur de recouvrement des armatures) avec un béton convenable, la durabilité ne dépend pas de la fissuration, sous réserve que l'ouverture des fissures soit limitée à quelques dixièmes de millimètre. À ce sujet, on peut déplorer la « prime » donnée abusivement aux armatures de petit diamètre par les règles CCBA 60 et 68 : avec de telles armatures, les fissures sont plus fines et mieux réparties, mais souvent au prix d'un encombrement excessif qui gêne la mise en place du béton ; il faut remarquer, en outre, que le périmètre des aciers étant plus grand par rapport à leur section, l'oxydation des barres de petit diamètre est souvent plus rapide que celle des grosses barres.

Ces nouvelles notions sont aujourd'hui entrées dans les faits, grâce en particulier à la notion de béton à « hautes performances » : l'emploi d'un adjuvant convenable permet de réduire la teneur en eau du béton, sans diminuer sa maniabilité, et d'obtenir un béton à haute performance et surtout de haute compacité, susceptible d'offrir une bien meilleure protection des armatures vis-à-vis de l'oxydation.

1.5.1.4. Les règles BAEL 80 et 91

Les règles BAEL 80, comme les précédentes, considéraient trois cas de fissuration, avec des définitions semblables mot pour mot à celles des règles CCBA 68. Elles apportèrent cependant une précision intéressante par le commentaire ci-après : « Les conditions considérées comme préjudiciables (ou très préjudiciables) pour la fissuration donnent lieu à des appréciations de la part du maître d'ouvrage ».

La différence essentielle consista en une limite fixe de la contrainte de l'acier :

- fissuration non préjudiciable : aucune vérification ;
- fissuration préjudiciable : contrainte de traction limitée à 240 MPa pour les armatures à haute adhérence ;
- fissuration très préjudiciable : contrainte de traction limitée à 176 MPa pour les mêmes armatures.

Ces règles étaient assorties de dispositions constructives à respecter : armatures de peau, et écartement maximal de barres d'un diamètre au moins égal à 20 mm dans les poutres. Les raisons de cette simplification résidaient essentiellement dans le caractère arbitraire des limites d'ouverture des fissures et de leur méthode de calcul, donnant à croire que l'on pouvait aboutir ainsi à une prévision de l'état d'une construction.

Lors de leur édition, les règles BAEL 91 reprirent l'ancienne terminologie en distinguant les trois cas de fissuration : peu préjudiciable, préjudiciable et très préjudiciable, et exprimaient le doute de leurs rédacteurs dans le commentaire de l'article 4.5.31 :

« Les fissures de largeur excessive peuvent compromettre l'aspect des parements, l'étanchéité des parois, la tenue des armatures vis-à-vis de la corrosion. Il est cependant reconnu qu'il n'est pas possible de fixer *a priori* une largeur de fissure à respecter, vu la très grande variabilité du phénomène; en outre, la durabilité des structures ne paraît liée qu'à un ordre de grandeur de l'ouverture des fissures (quelques dixièmes de millimètre pour les cas les plus courants). Compte tenu du commentaire ci-dessus, il est impossible de fixer des règles générales concernant le degré de nocivité, d'autant plus que l'appréciation dépend de nombreux facteurs parmi lesquels :

- l'environnement : à ce sujet le fascicule de documentation de l'Afnor P 18011 donne une classification des environnements agressifs ;
- la nature de la structure : parmi les facteurs défavorables, on peut citer les pièces minces (treillis) et la multiplication des surfaces de reprise ;
- l'utilisation de l'ouvrage avec comme facteurs défavorables l'importance des charges quasi permanentes aussi bien que des actions cycliques, ainsi que le contact régulier avec des produits nocifs tels que les sels de déneigement ;
- la prise en compte dans les calculs d'une valeur de limite élastique de l'acier supérieure à la valeur la plus courante 400 MPa à l'époque (la valeur courante est aujourd'hui 500 MPa) ;
- l'expérience acquise sur des ouvrages analogues qui doit englober le coût initial (tenant compte du ratio d'armatures), le coût d'entretien et la durabilité effective très variable en fonction du site et de la qualité de la construction.

En fonction de ces critères, certains textes spécifiques fixent les règles applicables ; par exemple le fascicule 74 du CCTG (Cahier des clauses techniques générales) traite des réservoirs et châteaux d'eau. Pour les bâtiments et ouvrages assimilés, la partie B (B 6.3 et B 7.3) donne certaines indications. À défaut, il appartient au CCTP (Cahier des clauses techniques particulières) de fixer les règles applicables ».

La contrainte limite des aciers dans les Règles BAEL 91 était, initialement, proportionnelle à la racine carrée de la contrainte caractéristique de rupture par traction du béton ; cette relation fut introduite dans le double but de tenir compte des rapports réels entre contrainte des aciers et résistance du béton à la traction, et de

favoriser l'utilisation des bétons de résistance élevée. Pour un béton moyen en génie civil, d'une résistance caractéristique en compression de 30 MPa et pour des armatures à haute adhérence, d'emploi quasi universel aujourd'hui, les limites de contrainte de l'acier à la traction en service étaient les suivantes :

- fissuration peu préjudiciable: pas de limite (l'état-limite ultime est déterminant);
- fissuration préjudiciable: 215 MPa;
- fissuration très préjudiciable: 176 MPa.

Comme les règles BAEL 80, les règles BAEL 91 accompagnèrent ces limites de dispositions constructives destinées à assurer une répartition convenable de la fissuration (section minimale d'armatures de peau pour les poutres de grande hauteur, écartement minimal des barres, etc.).

1.5.1.5. Évolution des règles relatives à la fissuration

À l'usage, les limites de contrainte de l'acier tendu proposées par les règles BAEL 91 se sont avérées trop sévères pour les constructions courantes; en effet, les valeurs numériques avaient été choisies de façon à donner des résultats équivalents à ceux des règles de 1980 pour des bétons de résistance 30 ou 35 MPa, valeurs convenant généralement aux ouvrages d'art; mais pour les bâtiments courants, dont le béton est souvent un B25, elles conduisaient à des limites beaucoup plus sévères et donc à un ferrailage excessif, non justifié au plan théorique, et qui amenait même les maîtres d'œuvre à considérer comme peu préjudiciable un environnement agressif, de façon à échapper à cette contrainte.

C'est ainsi que le groupe d'experts chargé de la maintenance des textes BAEL-BPEL a été amené à modifier une nouvelle fois les règles de fissuration qui deviennent les suivantes :

- dans le cas où la fissuration n'est pas préjudiciable, la contrainte des armatures tendues n'est pas limitée à l'état-limite de service;
- dans le cas où la fissuration est considérée comme préjudiciable, la contrainte des armatures tendues est limitée à la valeur ξ (MPa) donnée par l'expression :

$$\xi = \text{Min} \left\{ \frac{2}{3} f_e ; \text{Max} (0, 5 f_e ; 110 \sqrt{\eta f_{tj}}) \right\}$$

dans laquelle :

f_e désigne la limite d'élasticité des aciers utilisés exprimée en MPa;

f_{tj} la résistance caractéristique à la traction du béton exprimée en MPa;

– dans le cas où la fissuration est considérée comme très préjudiciable: la contrainte des armatures tendues est limitée à la valeur $0,8 \xi$ (MPa), l'expression de ξ étant donnée précédemment.

Les coefficients numériques ont été ajustés de façon à donner des résultats équivalents à ceux des règles BAEL 91 pour un béton de 40 MPa, valeur devenue courante aujourd'hui pour les ouvrages d'art. Bien entendu, les dispositions constructives prescrites par les éditions antérieures des règles sont intégralement conservées. L'application de ces formules suppose l'emploi de la limite d'élasticité réelle des armatures, c'est-à-dire 500 MPa dans les cas les plus courants¹. En effet, la valeur de 400 MPa mentionnée dans l'article 4.5,31 précédemment cité, ne l'est que dans le commentaire du dit article, et les commentaires du CCTG ne sont que des recommandations pour la rédaction des marchés (ils ne sont donc pas à mettre sur le même plan que le texte principal); de plus, elle n'est citée que lorsque la fissuration est peu préjudiciable et ne constitue donc qu'un artifice permettant de limiter raisonnablement la contrainte de traction dans les armatures sous combinaisons de service par l'intermédiaire d'un calcul à l'état-limite ultime.

1.5.1.6. L'Eurocode 2

L'Eurocode 2 (ENV1992-1), norme européenne publiée comme norme expérimentale Afnor sous l'appellation XP ENV 1992-1, ne traite actuellement dans le détail que des bâtiments courants mais précise cependant que ses principes ont valeur générale. D'ailleurs, la Partie 2, relative aux ponts, n'apporte pas de novation importante à la Partie 1 en ce qui concerne la fissuration du béton armé.

L'Eurocode consacre un chapitre à la durabilité, essentiellement fonction selon lui de l'environnement de la structure; les milieux se trouvent ainsi rangés en cinq classes comportant elles-mêmes des sous-classes si bien qu'au total 9 cas possibles sont répertoriés (Tableau 1.III)². Cette classification est utilisable pour établir le degré de protection globale requis.

L'Eurocode fournit une formule assez complexe pour déterminer une ouverture « probable théorique » des fissures, mais il admet que l'on se dispense de l'appliquer pourvu que certaines dispositions constructives soient respectées. Dans son article 4.4.2.1, il énonce le principe suivant: « La fissuration est presque inévitable dans les structures de béton soumises à flexion, effort tranchant, torsion ou traction résultant soit d'un chargement direct, soit de déformations gênées ou imposées ». Et, plus loin, il indique: « En l'absence de prescriptions spécifiques (telles que l'étanchéité), on peut admettre que, pour les classes d'exposition 2 à 4,

1. Les aciers à très haute limite d'élasticité sont exclus du champ d'application de ces règles.

2. Le tableau 1.III reproduit le tableau 4.1 des classes d'exposition de l'ENV1992-1, tableau identique à celui défini dans la norme d'exécution ENV206.

une limite de 0,3 mm de la fissure théorique maximale sous les combinaisons de charges quasi permanentes est généralement acceptable pour les éléments de béton armé des constructions en ce qui concerne l'aspect et la durabilité ».

L'Eurocode attire l'attention des projeteurs sur la nécessité de prendre en compte, lorsqu'il y a lieu, de possibles attaques physiques pouvant être dues à l'abrasion, à l'action du gel et du dégel, à la pénétration de l'eau. En général, l'attaque physique peut être combattue en spécifiant convenablement les matériaux utilisés, en limitant la fissuration sous les effets des combinaisons de charge du projet, en adoptant une forme de structure minimisant l'absorption d'eau ou l'exposition à l'humidité, en soignant les détails de conception des éléments ou des structures exposés tels les enrobages des armatures, le drainage ou l'étanchéité.

Pour certains ouvrages ou éléments d'ouvrage, l'étanchéité est une condition essentielle. C'est le cas des dalles sous chaussée des ponts en climat froid, pour lesquelles l'utilisation de sel antiverglas est fréquente en hiver. Pour assurer l'étanchéité d'une paroi ou d'une dalle, trois moyens peuvent être envisagés, séparément ou en combinaison :

- la limitation de la contrainte du béton à une valeur assez basse pour éviter sa fissuration ;
- le recours à la précontrainte ;
- l'application d'un revêtement assurant l'imperméabilité.

Le choix dépend de nombreux facteurs : forme et étendue de la surface, liaisons avec ses supports, et surtout nature des sollicitations qui lui sont appliquées ; il importe en effet de distinguer la traction de la flexion. Dans une paroi simplement fléchie, les fissures ne sont pas traversantes et le béton de la membrure comprimée par la flexion peut assurer l'étanchéité ; en revanche, si la paroi est tendue, ce qui est en particulier le cas des dalles sous chaussée des ponts métalliques ou à ossature composite, une plus grande prudence s'impose.

Tableau 1.III – Classes d'exposition en fonction de l'environnement.

CLASSE D'EXPOSITION	EXEMPLES DE CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT	
1 Environnement sec		Intérieur des bâtiments d'habitation courants ou bureaux
2 Environnement humide	a sans gel	<ul style="list-style-type: none"> – intérieur des bâtiments humides (ex: blanchisseries) – atmosphère extérieure – terrains non agressifs et/ou saturés d'eau
	b avec gel	<ul style="list-style-type: none"> – atmosphère extérieure avec risque de gel – terrains non agressifs et/ou dans l'eau et exposés au gel – composants intérieurs soumis à une humidité élevée et exposés au gel
3 Environnement humide avec gel et emploi de sels anti-verglas		– composants intérieurs et extérieurs exposés au gel et aux sels anti-verglas
4 Environnement marin	a sans gel	<ul style="list-style-type: none"> – composants totalement ou partiellement immergés dans l'eau de mer, ou dans une zone d'embruns – composants en atmosphère saturée de sel (zone côtière)
	b avec gel	<ul style="list-style-type: none"> – composants totalement ou partiellement immergés dans l'eau de mer ou dans une zone d'embruns et exposés au gel – composants en atmosphère saturée de sel et exposés au gel
Les classes suivantes se rencontrent seules ou combinées avec les classes ci-dessus:		
5 Environnement chimique agressif	a	<ul style="list-style-type: none"> – environnement chimique légèrement agressif (gaz, liquide ou solide) – atmosphère industrielle agressive
	b	– environnement chimique moyennement agressif (gaz, liquide ou solide)
	c	– environnement chimique fortement agressif (gaz, liquide ou solide)

En conclusion, pendant plusieurs décennies les ingénieurs se sont satisfaits d'idées préconçues confortées par des théories mathématiques séduisantes, mais non par l'expérience. L'observation du comportement des ouvrages en service aussi bien que les résultats de nombreux essais en laboratoire montrent que la largeur des fissures du béton armé ne joue qu'un rôle secondaire dans sa durabilité; pour celle-ci, l'épaisseur et la qualité du béton qui entoure les armatures sont en revanche deux facteurs essentiels. La réponse à des exigences de plus en plus précises de durabilité passe par la sélection de matériaux de qualité appropriée, une conception soignée des détails constructifs et, bien évidemment, un contrôle efficace de la qualité d'exécution.

1.5.2. Durabilité des ponts métalliques

Mis à part les erreurs de conception, les deux principales causes d'altération du comportement des ponts métalliques dans le temps sont la corrosion de l'acier et le phénomène de fatigue.

1.5.2.1. La corrosion atmosphérique de l'acier

Sous l'action d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, l'acier, s'il n'est pas protégé, se corrode, c'est-à-dire se transforme en oxydes, sulfures, carbonates etc. ou en une autre forme plus stable par rapport au milieu environnant. Ceci entraîne une dégradation de ses propriétés. Dans les ponts, le type de corrosion prédominant de l'acier est la corrosion dite en solution, résultant d'un processus électrochimique. Les facteurs de corrosion sont très nombreux. De manière simplifiée et non exhaustive, on peut dire que les uns dépendent du métal lui-même, et que les autres dépendent du réactif. Les premiers se répartissent en facteurs métallurgiques (composition, traitements thermiques, mécaniques et de surface) et en facteurs liés aux conditions d'utilisation (conception des pièces et des assemblages, sollicitations mécaniques, état de surface). Les seconds sont essentiellement la nature du réactif, sa concentration, son pH, sa teneur en oxygène, la température, la pression, la présence d'impuretés ou d'inhibiteurs. Les rôles principaux de la corrosion atmosphérique sont, en général, tenus par l'oxygène et l'eau. L'expérience montre que la corrosion ne devient sensible qu'au-delà d'un certain seuil du taux d'humidité relative, de l'ordre de 50 à 70 %. Mais la présence de poussières et autres dépôts solides étrangers à la surface de l'acier peut abaisser notablement la valeur de ce seuil et favoriser le déclenchement du phénomène. Certains composants, tel le sulfate d'ammonium, induisent et activent la corrosion à l'endroit où ils se déposent. D'autres composants agissent indirectement, par exemple en absorbant les gaz sulfureux acides (comme la suie). Il en résulte que la pollution atmosphérique, malheureusement fort importante dans les sites urbains des pays industrialisés, contribue à l'accélération du processus de corrosion. La température joue également un rôle déterminant dans l'accélération du

processus chimique d'oxydation : par exemple, une augmentation de 10°C double la vitesse de réaction. En atmosphère marine, le processus de corrosion se développe dans une mince couche d'électrolyte, à la surface de l'acier, due aux chlorures marins en solution.

1.5.2.2. La fatigue dans les ponts métalliques

Les trafics routier et ferroviaire engendrent des variations de contraintes cycliques d'intensité et de fréquence élevées susceptibles de provoquer des dommages en fatigue, principalement dans les zones d'assemblages.

Dans le cas des ponts routiers, les charges déterminantes sont donc les charges d'intensité moyenne mais d'application très fréquente. Les tabliers à dalle orthotrope sont particulièrement exposés : des fissures ont été découvertes là où les assemblages soudés des cadres avec les raidisseurs transversaux des âmes des poutres principales ne respectaient pas les règles de conception à la fatigue, notamment dans les endroits où, du fait de la présence de raidisseurs rigides ou de diaphragmes, la flexibilité de la couverture orthotrope sous l'effet des charges de trafic subissait une discontinuité brutale, d'où des actions dynamiques répétées (chocs) amplifiant des variations de contraintes locales.

Dans le cas des ponts ferroviaires, l'évolution du trafic au cours des dernières décennies a engendré un important endommagement en fatigue de ponts anciens qui n'avaient été ni conçus ni calculés pour résister à ce phénomène. Ce sont les pièces courtes (longerons et pièces de pont, poutres principales des petits ponts) qui subissent l'endommagement le plus important, car elles sont sollicitées par le passage de chaque essieu qui engendre un ou plusieurs cycles de forte intensité.

1.5.2.3. Amélioration de la durabilité des ponts métalliques

Les ponts métalliques, principalement les ponts en ossature mixte, occupent actuellement une place importante dans la panoplie des solutions compétitives dans la gamme des portées moyennes. Cela tient aux qualités sans cesse améliorées des aciers de charpente, aux progrès dans les techniques de fabrication et de montage, qui ont permis de garantir avec une plus grande fiabilité la durabilité escomptée des ouvrages.

Grâce à la mise au point de nouvelles méthodes d'élaboration, la composition chimique des aciers a été améliorée en vue d'augmenter leur ductilité (élimination d'éléments fragilisants tels le soufre, le phosphore, l'azote ou le silicium, ajout de nickel et de chrome) et l'aptitude au soudage (réduction de la teneur en carbone grâce à l'apport de manganèse, ajout à très faibles doses d'éléments améliorant la ténacité et facilitant le soudage, tels le molybdène, le niobium et le titane). La qualité du laminage a été fondamentalement augmentée, permettant d'obtenir des tôles de forte épaisseur constante (jusqu'à 150 mm pour les aciers agréés

CICAPAS) ou variable et de très haute qualité. Le procédé de laminage dit « thermomécanique » (acier 460 TM) permet d'augmenter les performances mécaniques sans augmenter la teneur en carbone, ce qui améliore la ductilité et facilite le soudage.

Les progrès dans le domaine de la soudure ont permis, en particulier, de réduire les risques de fissuration sous cordon et d'améliorer les techniques de contrôle non destructif (radiographie et ultrasons). L'amélioration des techniques d'oxycoupage et de soudage a permis d'obtenir une grande régularité de la qualité de fabrication.

Comme dans le cas des ouvrages en béton, l'amélioration de la qualité des aciers, la maîtrise des phénomènes de fatigue à travers des règles de dimensionnement affinées, et des principes de conception plus simples et plus « sains », notamment des assemblages, ont permis de faire des progrès considérables en matière de durabilité des ponts métalliques.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- BEEBY A.W. – Corrosion of reinforcing steel in concrete and its relation to cracking. Londres, The Structural Engineer, vol. 56 A, 1978.
- BEEBY A.W. – *Concrete in the oceans: cracking and corrosion*. Londres, UEG Cement & Concrete Association, 1982.
- GRATTESAT G. – *Conception des ponts*. Cours de l'École nationale des ponts et chaussées, Eyrolles, 1984, 3^e édition.
- BERNARD-GÉLY A., CALGARO J.-A. – *Conception des ponts*. Cours de l'École nationale des ponts et chaussées, Presses des Ponts et Chaussées, 1994.
- BERNARD-GÉLY A., CALGARO J.-A. – « Conception des ponts », Les Techniques de l'Ingénieur, *Construction* 5, 1997.
- BERNARD-GÉLY A., CALGARO J.-A. – « Ouvrages d'art - Aspect architectural et environnement », Les Techniques de l'Ingénieur, *Construction* 5, 1997.
- CALGARO J.-A., LACROIX R. – « L'Eurocode 2-Partie 1.1 ». *Revue française de génie civil*, vol. 1, n° 2, juin 1997.
- CALGARO J.-A., LACROIX R. (sous la direction de) – *Maintenance et réparation des ponts*. Presses des Ponts et Chaussées, 1997.
- CETUR/SETRA – *Sécurité des routes et des rues*, 1992.
- CHAUSSIN R., FUENTES A., LACROIX R., PERCHAT J. – *La précontrainte*. Presses des Ponts et Chaussées, 1992.
- DR/DSCR – « Instruction et recommandations pour la prise en compte des cyclistes dans les aménagements de voiries », novembre 1995.

PROJET ET CONSTRUCTION DES PONTS

LACROIX R., FUENTES A., THONIER H. – *Traité de béton armé*. Eyrolles, 1982.

MARTIN H., RAUSEN A., SCHIESSL P. – « Carbonation of concrete made with different types of cement ». Colloque Inter-Associations, Liège, 1975.

SETRA – *Répertoire des textes et documents techniques essentiels*. Nouvelle édition au début de chaque année.