

# Valorisation des bétons à hautes et très hautes performances dans les structures d'ouvrages d'art

**François TOUTLEMONDE**

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

**Frédéric LÉGERON**

Anciennement ingénieur au SETRA/CTOA  
Actuellement « Senior Bridge Engineer »  
chez Jacobs Civil

**André PIQUET**

Vinci-Construction Grands Projets  
Direction Conception et Études de Structures

## RÉSUMÉ

Cet article constitue la première partie d'une synthèse des travaux du groupe de travail BTHP du projet national BHP 2000. Un des objectifs de ce groupe était en effet de valoriser, par des études de variantes, l'utilisation des bétons à hautes et très hautes performances, dans des formes structurelles pertinentes. En mettant en pratique l'extension du règlement français aux bétons de résistance atteignant 80 MPa, validant ainsi la possibilité d'utiliser ce texte et de le mettre à profit dans les projets pour économiser et utiliser rationnellement le matériau, on a pu préciser, par des études suffisamment détaillées, les gains techniques rendus envisageables par l'utilisation des BHP voire des BTHP, typiquement dans la gamme des B80. Ces gains et les précautions qui les rendent possibles sont exposés dans cet article pour les trois exemples de structures d'ouvrages d'art qui ont été traités : piles de grande hauteur, caissons précontraints, ponts en arc. Ces types de structures ont constitué en France, depuis lors, des occasions favorables d'emploi des BHP pour de nombreux ouvrages.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

## APPLICATION OF HIGH AND VERY HIGH-PERFORMANCE CONCRETE IN BRIDGE STRUCTURES

### ABSTRACT

*The first part of findings and conclusions of the task committee "BTHP" within the National Project "BHP 2000", dealing with Very High Performance Concrete, is reported in this paper.*

*Namely, one objective of this group was to favour the use of high / very high performance concrete (VHPC) by studying alternative VHPC solutions to regular concrete ones, for relevant structure shapes. Using the French design code upgraded to 80 MPa-concrete has helped to validate the possibility to use these rules and to take benefit from its possibilities within projects, for a rational and cost-effective application of the material. The technical advantages potentially anticipated from use of HPC or VHPC (typically in the range of C80/95) could be precisely explored thanks to sufficiently detailed studies. Such advantages and the precautions necessary to ensure their feasibility are presented in this paper for the three bridge structures that have been studied: high-rise piers, pre-stressed box-girders, arch bridges. These structural types have since turned out attractive in France for applying HPC to a significant number of designed / erected bridges.*

*FIELD: Structural engineering.*

## Introduction

Le premier objectif du groupe BTHP du projet national BHP 2000 a été de valoriser, par des études de variantes, l'utilisation des bétons à hautes performances (BHP) et à très hautes performances (BTHP), dans des formes de structures adaptées [1]. Il s'agissait d'abord de mettre en pratique l'extension du règlement français aux bétons dont la résistance atteint 80 MPa, selon le texte proposé dès 1996 [2], et de valider ainsi la possibilité d'utiliser ce règlement dans les projets, pour économiser et utiliser rationnellement le matériau. Il s'agissait ensuite de préciser, par des études suffisamment détaillées, les gains techniques rendus envisageables par l'utilisation des BHP voire des BTHP, dans des formes structurelles *a priori* pertinentes. En ce sens, ces travaux ont été très complémentaires de ceux du thème « Économie et développement ». Compte tenu des intervenants, ils ont porté sur des exemples de structures d'ouvrages d'art, qui constituent historiquement en France [3] un domaine privilégié d'application des bétons de caractéristiques améliorées, et des BHP en particulier.

Les applications de BHP en France, qui ont notamment eu lieu pour des ouvrages exceptionnels, n'avaient pas en effet toujours pu tenir compte dans les projets des propriétés de résistance améliorées, et, jusqu'en 1991 (limite du règlement portée à B60), voire jusqu'en 1999 (limite du règlement portée à B80), ce sont surtout des propriétés « secondaires » qui ont été valorisées [4]. On citera notamment :

- la fluidité du BHP à l'état frais, intéressant notamment les parties fortement ferraiillées, et favorisant la mise en œuvre par pompage (cas de la Grande Arche de la Défense) ;
- la résistance au jeune âge, permettant des gains de temps (décoffrage, mise en précontrainte) d'où des économies significatives ;
- la durabilité, améliorée par réduction des caractéristiques de transfert, valorisée notamment pour les ouvrages en milieu maritime ou montagneux, et les ouvrages nucléaires.

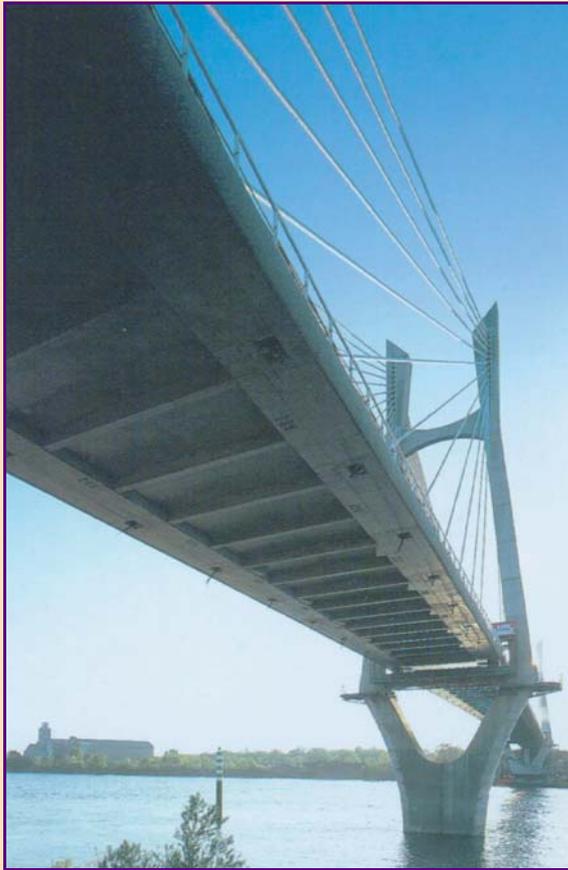
Cependant, dès avant l'extension du BAEL/BPEL à B60 en 1991, l'utilisation des BHP s'est accompagnée d'une recherche de formes structurelles adaptées (développement des âmes triangulées comme pour les viaducs de Glacières-Sylans sur l'autoroute A40, dalles amincies pour les ponts mixtes comme au viaduc de la Roize, pylônes des ponts à haubans de Normandie ou de l'Iroise). Le retour d'expérience des chantiers, la capitalisation d'expérimentations de laboratoire ouvrant largement le domaine des BHP, ont conduit, grâce au groupe AFREM animé par F. de Larrard, à la proposition d'extension du règlement jusqu'aux B80. C'est sur la base du texte proposé en 1996 [2], et adopté sans modification majeure en 1999, que les travaux du projet national se sont effectués.

On a volontairement procédé à des études de variantes, à fonctionnalité identique, pour lesquelles on a recherché de façon systématique l'économie de matière (béton, et ferrailage ou précontrainte induits), et indiqué si possible les gains en termes de méthodes. Cette démarche a été adoptée compte tenu du poids grandissant des critères d'économie en ressources naturelles, d'aléa réduit sur les fondations, et de coût initial.

Les études réalisées ont constitué des occasions d'application de la nouvelle réglementation, permettant, par exemple pour le fluage, de valider les outils de calcul utilisant les nouvelles formules. Les thèmes d'étude (piles de grande hauteur, caissons précontraints, arcs) ont constitué, depuis lors, des formes structurelles effectivement favorisées par l'emploi de BHP : piles des viaducs de Verrières [5], de Tulle [6] (fig. 1) et de Millau [7], tablier du pont de Beaucaire [8] (fig. 2), pylônes du pont de Rion-Antirion [9], du viaduc du Chavanon [10], tablier du pont d'Altenheim-Eschau [11], pont de Jonches [12], hourdis du pont sur le Bras de la Plaine [13], arcs du Crozet [14] etc.



*Fig. 1 - Viaduc de Tulle (cliché du LRPC de Clermont-Ferrand).*

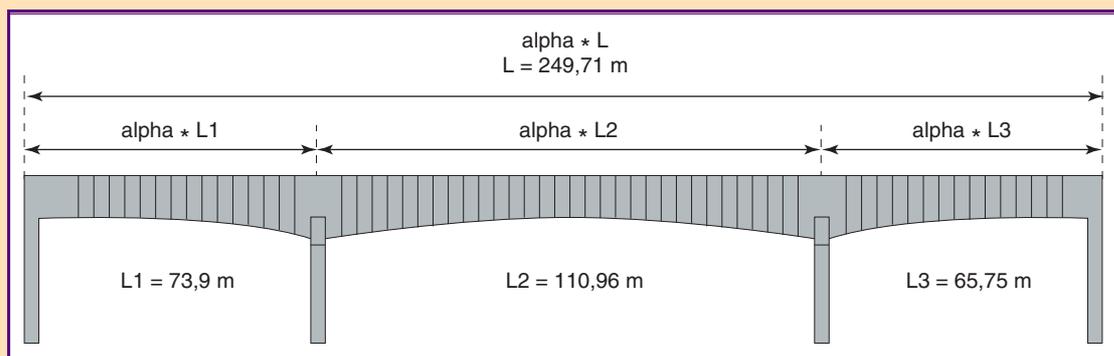


*Fig. 2 - Pont de Beaucaire. Intrados du tablier  
(cliché issu de la revue  
« Construction Moderne »).*

## Tablier d'ouvrage constitué d'un caisson en béton précontraint

L'étude de la valorisation des BTHP dans le cas d'un tablier de pont en béton précontraint, constitué d'un caisson construit par encorbellement, a bénéficié de l'opportunité d'un ouvrage de référence en B40 récemment étudié et construit, le viaduc de Mesnil-Le-Roi sur la Seine, sur l'autoroute A14. L'ouvrage comporte une travée centrale de 110 m (fig. 3), avec des ratios (hauteur/portée) classiques de 1/20 sur pile et 1/37 à la clé (fig. 4).

Quatre variantes ont été étudiées, dont trois avec du B80 avec fumée de silice (limite actuelle du règlement) et une en B120 (avec formules réglementaires extrapolées sans modification). L'objectif des trois premiers calculs, menés jusqu'au niveau de détail d'un calcul d'exécution, était de quantifier précisément les gains liés à la substitution de B80FS à un B40. Pour chacune des trois variantes étudiées en B80FS, l'optimisation était effectuée selon une logique différente :



*Fig. 3 - Profil en long du viaduc de Mesnil-Le-Roi.*

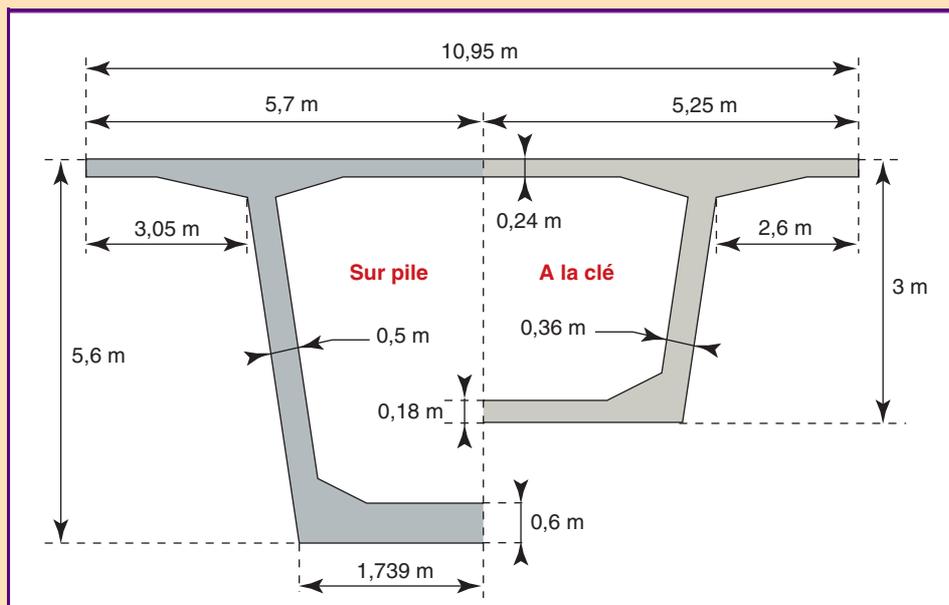


Fig. 4 - Coupe transversale du caisson du viaduc de Mesnil-Le-Roi (solution B40).

- réduction de la quantité d'aciers de précontrainte, en conservant les mêmes sections et la même portée que dans la solution de base en B40 ;
- augmentation de la portée (en effectuant une affinité de rapport  $\alpha$  sur le profil en long), en conservant les sections et la quantité de précontrainte identiques à celles de la solution de base en B40. La même stratégie a été appliquée au cas du B120 FS avec, dans les deux cas, la possibilité ou non d'utiliser un câble 19T15 supplémentaire dans la réservation prévue, pour mieux mettre en évidence les gains possibles ;
- réduction des épaisseurs de la section transversale, en conservant la portée de la solution de base et la même quantité d'aciers actifs.

L'étude des variantes a été effectuée en procédant à la vérification des mêmes configurations de chargement que pour la solution de référence, permettant ainsi de tester l'implantation correcte des formules de l'extension BHP du règlement dans un programme industriel de calcul. Les quantités optimisées sont récapitulées dans le tableau I, en indiquant les cas de charge dimensionnants, et le taux de travail  $\beta$  du matériau béton, en compression et en traction, par rapport à la contrainte limite autorisée.

**TABLEAU I**  
Caractéristiques principales des solutions B40/ B80FS/ B120FS

Béton	Portée	Section	Pré-contrainte	Hauteur/ portée (s/pile)	Hauteur/ portée (à la clé)	$\beta_c$ taux de travail en compression	$\beta_t$ taux de travail en traction	Observations
B40	110 m (réf.)	réf.	120 t (réf.)	1/19,8	1/37,0	83 % ELS comb. rare	74 % ELS comb. rare	
B80 FS	réf.	réf.	- 11 % (13 t)	1/19,8	1/37,0	39 % ELS quasi-perm.	47 % construct. fléau	- 5 % ferr. passif
B80 FS	+ 12 % 124 m	réf.	réf.	1/22,2	1/41,4	56 % ELS quasi-perm.	94 % construct. fléau	
B80 FS	+ 15 % 128 m	réf.	+ 1 19T15 (F + 10 %)	<b>1/22,8</b>	<b>1/42,5</b>	60 % ELS quasi-perm.	96 % construct. fléau	
B80 FS	réf.	- 14 % lim $\tau_u$	réf.	<b>1/25,8</b>	<b>1/46,3</b>	61 % ELS quasi-perm.	67 % ELS comb. rare	- 12 % ferr. passif
B120 FS	+ 18 % 131 m	réf.	+ 1 19T15 (F + 10 %)	1/23,4	1/43,6	39 % ELS quasi-perm.	100 % ELS fréquent	limite = 0 traction

Pour une portée et une section transversale inchangées, c'est-à-dire pour une simple substitution du béton, les gains de ferrailage sont significatifs (5 % sur les aciers passifs, 11 % sur les aciers de précontrainte) ; cependant, les capacités du matériau sont assez mal valorisées. Si l'on cherche à augmenter la portée, avec un profil en travers inchangé et une quantité de précontrainte identique, la limite que constitue la résistance en traction intervient pour les solutions B80 durant les phases de construction (connexion du dernier voussoir du fléau avant clavage), tandis que la limite que constitue l'absence de tractions intervient en service pour la solution B120 (ELS, combinaison fréquente). L'accroissement relatif de portée (+ 12 à + 18 %) peut s'avérer intéressant selon les contraintes du projet, notamment vis-à-vis du positionnement des appuis. Dans ces solutions cependant, la haute résistance en compression du béton est assez mal valorisée. Finalement, la solution la plus intéressante, et qui conduit aux proportions les plus élancées, consiste à optimiser la section transversale (fig. 5). La limite des gains de matière provient du cisaillement maximal autorisé, tant à l'ELS qu'à l'ELU, et des dispositions constructives (enrobage des gaines de précontrainte et goussets). La réduction de l'épaisseur des âmes est intéressante vis-à-vis des effets thermiques au jeune âge. Globalement, les capacités du BHP sont valorisées de façon satisfaisante, sans taux de travail excessif en traction, et le taux de ferrailage passif reste peu modifié, ce qui doit permettre de garantir la qualité du bétonnage. On retiendra finalement de la solution optimisée des ratios hauteur sur portée de 1/26 sur pile, et de 1/46 à la clé, qui mettent bien en évidence les possibilités tant esthétiques que fonctionnelles de ce type de structures en BTHP.

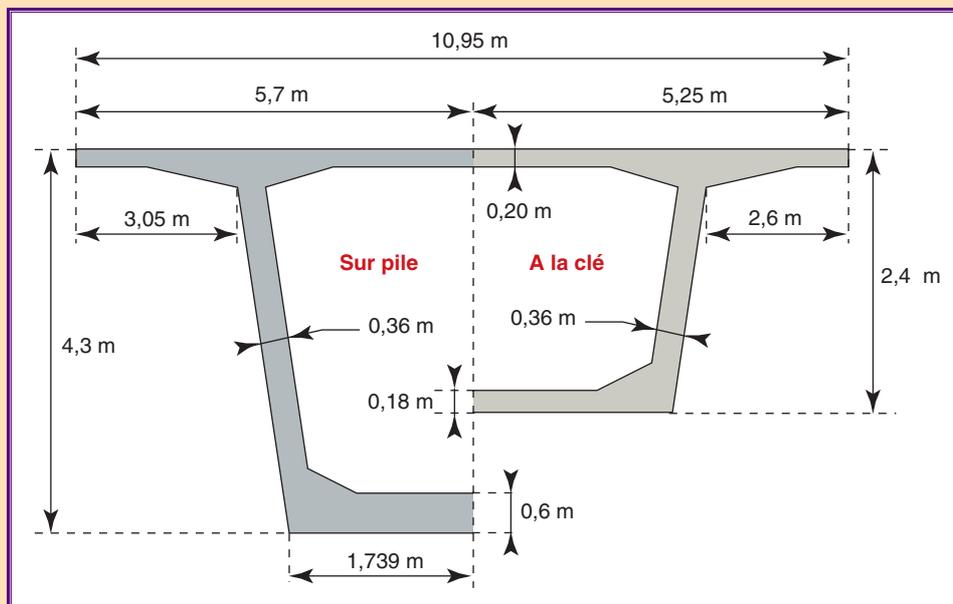
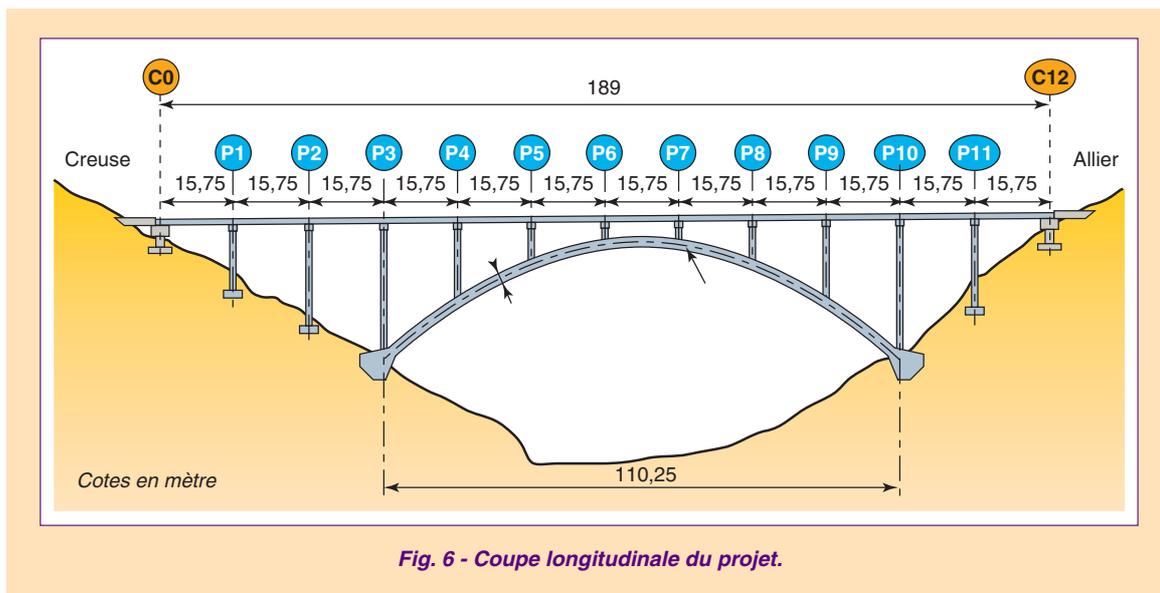


Fig. 5 - Coupe transversale, caisson du viaduc de Mesnil-Le-Roi (solution B80FS optimisée).

## Cas d'un pont en arc de moyenne portée

Le fonctionnement d'un arc, essentiellement en compression, et la recherche fréquente de solutions esthétiques de franchissement, ont conduit à profiter d'un ouvrage à l'étude au SETRA, pour envisager une variante permettant d'optimiser l'emploi du BHP. L'étude s'est voulue généralisable en traitant un ouvrage de portée non exceptionnelle. À partir du projet de départ, qui prévoyait un arc de ligne moyenne circulaire et des sections en caisson, les solutions B40 et B80FS ont été optimisées vis-à-vis des quantités de matière en conservant les caractéristiques générales du projet (fig. 6) : arc de 100 m de portée, hauteur à la clé 25 m, longueur totale 189 m, répartition des pilettes tous les 15,75 m, tablier de 11 m de large.

Compte tenu d'un trafic relativement faible, et malgré une portée modérée, l'arc a été choisi funiculaire des charges permanentes. Pour des raisons architecturales, le projet initial prévoyait une section en caisson pour l'arc, d'où des contraintes de compression très réduites. Le caisson se justifie en effet surtout pour les grandes portées, par son inertie de torsion. Pour des portées plus réduites,



une section en H est plus économique, tout en apportant une bonne inertie latérale. Dans le cas traité, une section en double I avec entretoisement au niveau des pilettes s'est avérée économique, tout en permettant de vérifier l'absence de traction à l'ELS fréquent, et des contraintes de traction limitées à  $f_{tj}$  à l'ELS rare (règles de conception inspirées de la classe II du BPEL). Une optimisation du verinage, prévu avant clavage de l'arc, a été étudiée, afin de minimiser les tractions aux naissances de l'arc. L'amincissement des pilettes et du tablier a été recherché, avec des formes simplifiées. *A posteriori*, des pilettes d'inertie longitudinale réduite, mais conservant une section suffisante, auraient été plus adaptées.

Le pré-dimensionnement est effectué en calculant les charges permanentes, en optimisant la forme de l'arc, puis en vérifiant les contraintes de traction aux ELS rare et quasi-permanent (en particulier à long terme). Ce dernier cas (incluant les effets thermiques) est toujours dimensionnant ; en effet, on y atteint une traction proche de  $f_{tj}$  en fibre inférieure de l'arc au niveau de la culée. Les dimensions et taux de travail qui se déduisent de cette étape sont récapitulés dans le tableau II et graphiquement (fig. 7 et 8).

**TABLEAU II**  
**Caractéristiques géométriques des solutions B40/B80FS.**  
**Contraintes aux ELS long terme sous combinaison rare**

	Épaisseur maximale du tablier	Section des pilettes	Dimensions des I (demi-arcs)	Épaisseur de l'âme des I	Traction maximale	Compression maximale
B40	0,641 m	1,1 m × 1,35 m	1,2 m × 2,0 m	0,4 m	3,16 MPa	19,3 MPa
B80	0,5 m	1,1 m × 1,0 m	1,1 m × 1,8 m	0,25 m	4,93 MPa	23,1 MPa

Cette étape met en évidence la difficulté de valoriser effectivement la capacité du B80 en compression (contrainte maximale de 48 MPa au lieu de 24 MPa pour le B40). Par contre, la limite en traction est atteinte dans les deux cas (3 MPa pour le B40 ; 5,1 MPa pour le B80 FS). Si on réduit la hauteur de l'arc, en optimisant de même la section, on aboutit à un élancement (hauteur/portée) minimal de l'ordre de 1/5 pour valoriser de façon intéressante la résistance en compression du BHP, soit un arc relativement surbaissé.

La vérification de ce pré-dimensionnement est effectuée au stade du projet d'ouvrage d'art en considérant successivement différents aspects complémentaires du calcul. Ainsi, la vérification de l'arc à l'ELU ne conduit pas à des renforcements additionnels. Le cas de charge transversale le plus défavorable correspond à la charge de vent avant clavage, qui nécessite de toute façon un arrimage pro-

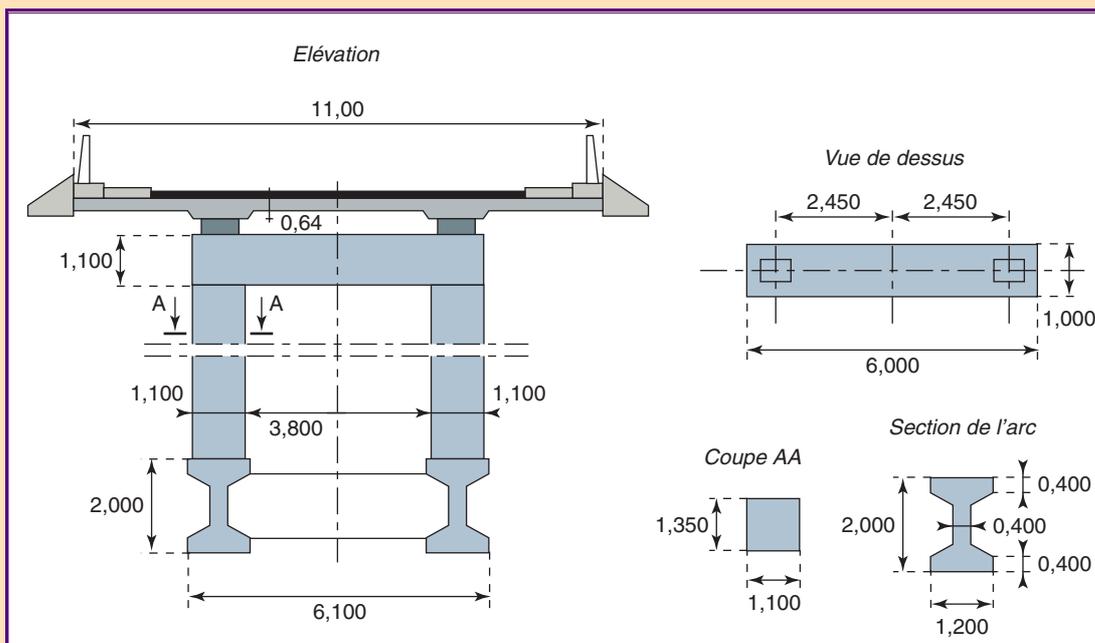


Fig. 7 - Coupe transversale de l'arc, des pilettes et du tablier, solution B40.

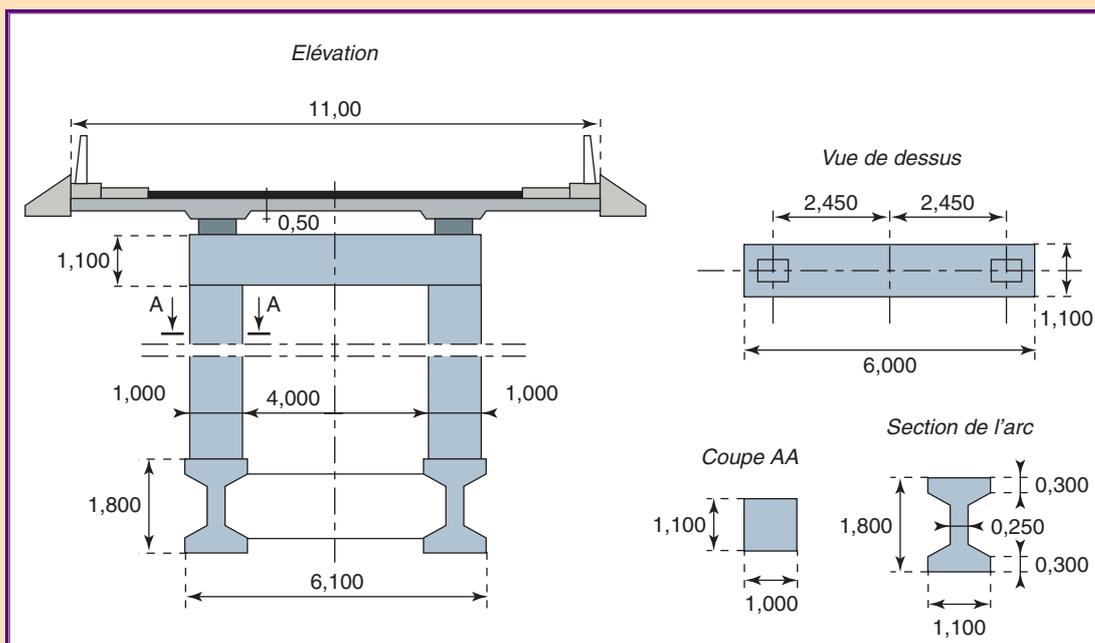


Fig. 8 - Coupe transversale de l'arc, des pilettes et du tablier, variante B80FS.

visoire des fléaux. Après clavage, les solutions B40 et B80 sont équivalentes en termes de résistance ; l'arc en B80, plus mince, a moins de prise au vent, mais également moins de rigidité.

Le déversement latéral constitue le premier mode d'instabilité. En appliquant un défaut initial égal à  $1/2000^e$  de la portée, dans un calcul non linéaire incrémental, jusqu'à la perte de stabilité, on identifie un coefficient de sécurité, en rapportant la charge de ruine calculée à la charge de dimensionnement. Pour le premier mode latéral, le plus critique, la solution B80 est assez nettement préférable, avec un coefficient de sécurité proche de 3, au lieu de 2 pour le B40. Au stade du projet, compte tenu de la géométrie de l'arc, on l'a supposé construit par encorbellements, avec stabilisation par

haubanage provisoire. La réduction du poids de l'arc en B80 (- 21 %) induit une réduction de 12 % environ du poids des haubans. En revanche, la stabilisation vis-à-vis des charges de vent reste quasiment inchangée. Par ailleurs, les pilettes, même si leur détail architectural n'a pas été considéré, restent dans les deux solutions des pièces relativement massives pour lesquelles les aspects thermiques lors de la prise et du durcissement requièrent des précautions.

Le calcul scientifique du fluage met en évidence l'intérêt d'un béton B80 avec fumée de silice [15]. Les contraintes de compression apportées par le vérinage se trouvent d'autant mieux maintenues que les déformations de fluage sont faibles (tableau III). Ainsi, la flèche calculée de l'arc, à long terme, varie seulement de 1,9 cm par rapport à la géométrie initiale, dans la solution B80 FS, au lieu de 5,6 cm pour le B40.

**TABLEAU III**  
**Contraintes et flèches de l'arc, à court terme et à long terme**

Après vérinage et clavage					
Déplacement vertical de la clé (cm)	Contraintes aux abouts (MPa)		Contraintes à la clé (MPa)		
	Fibre inférieure	Fibre supérieure	Fibre inférieure	Fibre supérieure	
B40	1,6	4,9	9,3	5,5	4,6
B80	0,8	5,6	8,6	5,1	5,0
À long terme (effets du retrait et du fluage)					
Déplacement vertical de la clé (cm)	Contraintes aux abouts (MPa)		Contraintes à la clé (MPa)		
	Fibre inférieure	Fibre supérieure	Fibre inférieure	Fibre supérieure	
B40	- 4,0	8,2	5,8	3,6	6,4
B80	- 1,1	7,5	6,6	4,0	6,0

**TABLEAU IV**  
**Coût matière (Francs français, valeur 1998 - 1 FF ~ 0,15 €)**

	B40			B80			Variation B80/B40 (%)	
	Quantité	Coût (FF)	Coût (k€)	Quantité	Coût (FF)	Coût (k€)	Quantité	Coût
<b>Pilettes</b>								
Béton	572 m <sup>3</sup>	572 000	87,2	424 m <sup>3</sup>	678 400	103,4	- 25,9	+ 18,6
Aciers passifs HA	55 t	495 000	75,5	55 t	495 000	75,5	0	0
Aciers ronds lisses	5,3 t	47 700	7,3	4,24 t	38 160	5,8	- 20	- 20
Coffrages soignés	1 760 m <sup>2</sup>	440 000	67,1	1 515 m <sup>2</sup>	378 750	57,7	- 13,9	- 13,9
<b>Arc</b>								
Béton	595 m <sup>3</sup>	595 000	90,7	420 m <sup>3</sup>	672 000	102,4	- 29,4	+ 12,9
Aciers passifs HA	42 t	378 000	57,6	42 t	378 000	57,6	0	0
Aciers ronds lisses	6,93 t	62 370	9,5	6,93 t	62 370	9,5	0	0
Coffrages soignés	2 750 m <sup>2</sup>	825 000	125,8	2 600 m <sup>2</sup>	780 000	118,9	- 5,5	- 5,5
<b>Tablier</b>								
Béton	624 m <sup>3</sup>	624 000	95,1	554 m <sup>3</sup>	886 400	135,1	- 11,2	+ 42,1
Aciers passifs HA	59 t	531 000	81,0	65 t	585 000	89,2	+ 10,2	+ 10,2
Aciers ronds lisses	5,54 t	49 860	7,6	5,54 t	49 860	7,6	0	0
Coffrages ordinaires	100 m <sup>2</sup>	25 000	3,8	100 m <sup>2</sup>	25 000	3,8	0	0
Coffrages soignés	2 250 m <sup>2</sup>	675 000	102,9	2 250 m <sup>2</sup>	675 000	102,9	0	0
Cure du béton	2 101 m <sup>2</sup>	42 020	6,4	2 101 m <sup>2</sup>	42 020	6,4	0	0
<b>Total</b>		<b>5 361 950</b>	<b>817,4</b>		<b>5 745 960</b>	<b>876,0</b>		<b>+ 7,2</b>
<b>Total (sans tablier)</b>		<b>3 415 070</b>	<b>520,6</b>		<b>3 482 680</b>	<b>530,9</b>		<b>+ 2,0</b>

Le bilan des quantités, avec des hypothèses probables de prix des matériaux, donne une indication de coût initial. Le volume total de béton dans la solution « tout B80 » est de 1 398 m<sup>3</sup> au lieu de 1 791 m<sup>3</sup> pour le B40, soit une réduction de 22 %. Avec une hypothèse de prix du béton mis en œuvre de 1 000 F/m<sup>3</sup> pour le B40 (150 €) et de 1 600 F/m<sup>3</sup> pour le B80 (243 €), d'après des prix moyens en France en 1998, la solution « tout BHP » a un coût matière légèrement supérieur (tableau IV), la solution « arc et pilettes en BHP – tablier B40 » (3,48 MF) est pratiquement équivalente à la solution B40 de référence (3,42 MF). L'économie sur les haubans de stabilisation (0,2 MF) donne même un léger avantage à la solution B80, pour laquelle on peut espérer bénéficier de délais réduits par la montée en résistance rapide.

Sachant que les chiffres indiqués ne représentent finalement qu'un quart environ du coût initial de l'ouvrage, il est clair que « l'avantage économique » du BHP n'est pas fourni de façon décisive par le projet, même si la solution optimisée obtenue reste de coût matière comparable. Par ailleurs, ce chiffrage initial ne tient pas compte de la valorisation des économies de ressources naturelles réalisées, ni des gains induits par une meilleure durabilité du BHP.

L'étude réalisée met donc bien en évidence les avantages et les limites de la valorisation du BHP dans un arc de moyenne portée :

- la valorisation de la capacité du matériau en compression dans l'arc requiert une forme surbaissée (rapport hauteur/portée inférieur à 1/5), des charges permanentes importantes, et, pour des portées moyennes, une section en double I (mieux adaptée et plus économique qu'un caisson ou une section en H) ;
- les économies de matière permises par le B80, ici de l'ordre de 20 %, se trouvent limitées par la contrainte autorisée en traction à l'ELS ; cela renforce l'exigence d'une résistance en traction élevée, maîtrisée et durable pour les BHP ;
- la quantité d'aciers passifs diffère peu dans les deux solutions, d'où un ratio plus élevé pour la variante BHP, nécessitant une attention particulière pour la qualité du bétonnage ;
- la solution BHP est supérieure techniquement vis-à-vis des instabilités et du fluage (notamment avec le choix d'un B80 FS). Elle est pratiquement équivalente, au moins pour l'arc et les pilettes, en termes de coût matière, l'étude précise des méthodes devenant décisive pour le coût initial de l'ouvrage.

## Pylônes et piles de grande hauteur

Les dernières années ont vu se construire ou s'étudier un nombre important d'ouvrages d'art comportant une ou plusieurs piles de grande hauteur. Qu'il s'agisse, dans des sites encaissés, de ponts mixtes, de ponts à voussoirs construits par encorbellements, ou de ponts poussés, ou encore de ponts à haubans de grande portée pour de larges brèches, ces ouvrages nécessitent un ou plusieurs grands appuis en béton, ce matériau étant « naturellement » choisi par rapport au métal pour des considérations d'économie initiale et d'entretien. En fait, les piles ou pylônes de ponts à haubans travaillent essentiellement en compression, et mobilisent « naturellement » la propriété constructive majeure du béton. Avec la grande hauteur, qui concerne (pour fixer les idées) des éléments de hauteur supérieure à 70 m et d'élancement inférieur ou égal à 1/10 (rapport de la dimension transversale maximale à la hauteur de la pile), la compression est accentuée tant par le poids propre de la pile que par le poids de tablier supporté, dans la mesure où une grande hauteur est associée généralement, pour des raisons architecturales, à une grande portée. Il s'agit donc d'un domaine de valorisation logique voire privilégié des bétons de haute résistance en compression. Le travail du groupe BTHP a consisté essentiellement à formaliser les spécificités d'emploi des BHP et BTHP dans ce type d'ouvrages, et à mettre en évidence leur intérêt technico-économique, en constituant un ouvrage guide spécifique [16]. Ce document (fig. 9) est organisé en fonction des différents métiers de l'ingénieur : dans un premier chapitre, ce qui concerne l'ingénierie du matériau dans le cas particulier du BHP des piles et pylônes ; dans un deuxième, les questions qui relèvent de l'ingénieur des méthodes : coffrage, bétonnage, problèmes thermiques ; dans un troisième chapitre sont regroupées les questions qui relèvent du bureau d'études, pour le calcul d'exécution comme pour les justifications en service et aux états limites ultimes ; enfin, un quatrième chapitre traite des questions que devra se poser le maître d'œuvre (convenance, suivi et contrôles).

Au stade du projet, les caractéristiques mécaniques les plus intéressantes des BHP pour les piles de grande hauteur sont :

- la résistance élevée en compression. La possibilité pratique de faire du B80 est en fait principalement liée à la disponibilité de granulats de bonne qualité dans les 50 km autour du site du projet. C'est donc une possibilité qui doit être examinée en priorité avant de se lancer dans les calculs. Le BAEL91 modifié 99 indique des modifications aux lois de comportement à prendre en considération pour des BHP jusqu'à B80, validées par une large banque de données expérimentales. On tire ainsi parti de la résistance des BHP à l'ELU et à l'ELS pour les efforts normaux élevés ;
- une résistance en traction élevée, dont on tirera parti à l'ELS et dans le contrôle des déformations (lorsque l'on tient compte de la résistance en traction et/ou que l'on considère la fissuration) ;
- un module élastique élevé, qu'on appréciera pour le contrôle des déformations et la rigidité de la structure ;
- un faible fluage, dont on appréciera l'intérêt notamment pour le contrôle des déformations de second ordre.

En général, les piles seront dimensionnées par l'ELS lorsque leur taux de compression (charge – hors combinaisons accidentelles – divisée par la section et par la résistance en compression à 28 jours) est inférieur à 15-20 %. Dans les autres cas, l'ELU est dimensionnant. Ainsi, pour un taux de compression normale d'environ 20 %, un gain de matière de l'ordre de 20 % est possible. À l'ELS en flexion simple, on pourra tirer parti d'une contrainte admissible supérieure dans les armatures en traction (seulement en fissuration préjudiciable ou très préjudiciable), ainsi que d'un coefficient d'équivalence inférieur : en raison du module d'Young élevé pour les BHP, et d'un fluage réduit, une valeur de 9 est utilisée, au lieu de 15 pour le béton ordinaire. Cela entraîne un gain de résistance, à géométrie identique, de l'ordre de 2 à 5 % pour une poutre en flexion, suivant le type de section et la quantité d'armature de flexion, ce qui est plutôt faible. L'essentiel du gain en flexion simple est dû à la contrainte admissible dans l'acier qui est donnée dans le BAEL91 modifié 99. Ce gain peut représenter jusqu'à 25 % pour un B80 par rapport à un B40. On retrouve ce gain pour les sections en flexion composée ; il se trouve amplifié pour les sections fortement sollicitées à l'effort normal. Ainsi, dans ce cas, pour un même taux de ferrailage, il faut multiplier par deux l'épaisseur des parois pour obtenir un diagramme d'interaction similaire entre la section en B40 et la section en B80.

Si le BAEL91 modifié 99 permet cette augmentation de la contrainte admissible dans les aciers en traction, pour les structures en BHP, en revanche l'Eurocode 2 ne prévoit en général pas de dépendance des contraintes admissibles à la résistance en compression. Il n'y aura donc intérêt à utiliser du BHP, notamment dans le cas des poutres calculées à l'ELS, que sous réserve d'utiliser la méthode, plus complexe, et également proposée par l'EC2, consistant à calculer des ouvertures de fissures.

Plusieurs ouvrages ont été réalisés avec des piles excédant 100 m de hauteur. On peut donc, pour le pré-dimensionnement, en dégager quelques constantes. L'élancement dans le sens transversal (rapport de la dimension transversale maximale à la hauteur de la pile) peut généralement être de l'ordre de 1/10 et dans le sens longitudinal, de l'ordre de 1/15. Moins la pile est élancée, mieux elle se comportera au vent, et les élancements sont donc à évaluer en fonction des méthodes de construction et des efforts. Des épaisseurs de l'ordre du mètre sont généralement rencontrées. Pour les piles très élancées ces épaisseurs pourront être plus importantes, mais, pour les piles peu élancées, on sera limité par des épaisseurs minimales de l'ordre de 40 à 50 cm. On aura aussi comme souci que la sec-

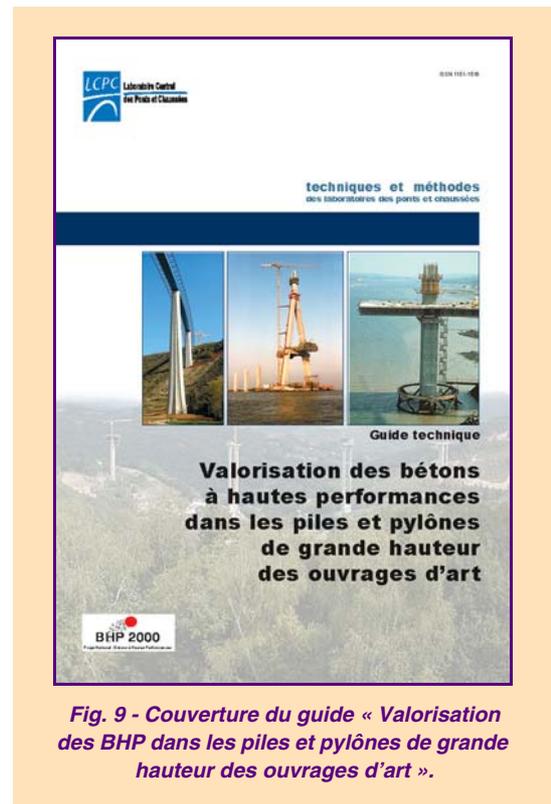


Fig. 9 - Couverture du guide « Valorisation des BHP dans les piles et pylônes de grande hauteur des ouvrages d'art ».

tion critique ne soit à la base de la pile que si les variations de coffrages extérieurs sont linéaires. Si elles sont paraboliques ou de degré supérieur dans la direction d'étude, les sections au tiers de la hauteur peuvent devenir les plus critiques suivant les épaisseurs retenues et les ferrailages.

On illustre dans la suite, sur un cas d'école, les ordres de grandeur de quantités de matériaux économisées, si on prédimensionne une pile de grande hauteur en B80, par rapport à une alternative en B40. Ces ordres de grandeur sont évidemment à utiliser avec précaution ; ils donnent cependant une idée assez juste des quantités sur lesquelles le projeteur peut partir pour poursuivre l'optimisation en effectuant les autres vérifications.

Soit donc une pile de pont de 150 m de hauteur, soumise à une descente de charge quasi-permanente de 165 MN en tête et à un moment ELU à sa base de 3 300 MN.m (ce moment incluant les effets du second ordre). On étudie de façon simplifiée quatre solutions :

- ① une pile en B40, renforcée longitudinalement à  $\rho = 1\%$  ;
- ② une pile en B40, renforcée longitudinalement à  $\rho = 2,5\%$  ;
- ③ une pile en B80, renforcée longitudinalement à  $\rho = 1\%$  ;
- ④ une pile en B80, renforcée longitudinalement à  $\rho = 2,5\%$ .

Pour trouver la géométrie de cette pile, on suppose que le poids de la pile est obtenu en considérant une section moyenne sur les 150 m, représentant la moitié de la section en pied de pile. On suppose que les dimensions extérieures de la pile sont fixées par des considérations architecturales à  $10 \times 15$  m. La variation de section est telle que la section la plus chargée correspond au pied de la pile. Le problème revient donc à déterminer l'épaisseur des parois pour les quatre solutions. On suppose enfin que l'effort de flexion dans l'autre direction est tel que le ferrailage et l'épaisseur de la pile sont constants.

Les épaisseurs de parois déterminées sont récapitulées dans le tableau V, qui donne aussi l'effort normal et le moment fléchissant ELU. Les diagrammes d'interaction des quatre solutions sont représentées sur la figure 10. On voit sur ces diagrammes que la pile initiale (B40 avec 1 % d'acier) est assez comprimée à l'ELU (avec un taux d'effort normal d'environ 18 %, ce qui fait une contrainte moyenne à l'ELS quasi-permanent de 5,5 MPa) contrairement à la pile en B80 ferrillée à 1 % (11 % avec une contrainte moyenne à l'ELS quasi-permanent de 6,3 MPa). Pour les piles ferrillées à 2,5 %, le taux d'effort normal est de 24 % pour la pile en B40 et de 15 % pour la pile en B80, et les contraintes ELS quasi-permanentes sont de 7,0 et 9,0 MPa, respectivement.

En prenant la solution 1 en B40 ferrillée à 1 % comme solution de référence, on peut évaluer les gains de matériaux pour ces deux solutions (tableau VI). Pour cela, on a considéré que la pile était ferrillée de haut en bas avec le même pourcentage. On ne tient pas compte de l'acier transversal qui est difficile à évaluer, mais devrait globalement suivre les mêmes tendances. On note que les solutions ferrillées à 2,5 % présentent des gains importants en béton, mais des poids d'armature beaucoup plus importants.

On s'est efforcé de donner une indication sur l'aspect économique de cet exemple, au stade du coût matière. Pour cela, on considère que le prix de coffrage n'intervient pas (les coffrages extérieurs étant maintenus constants, la variation de coffrage intérieur est très faible, de l'ordre de moins de 1 % avec, en plus, un prix unitaire généralement deux fois moins élevé que pour

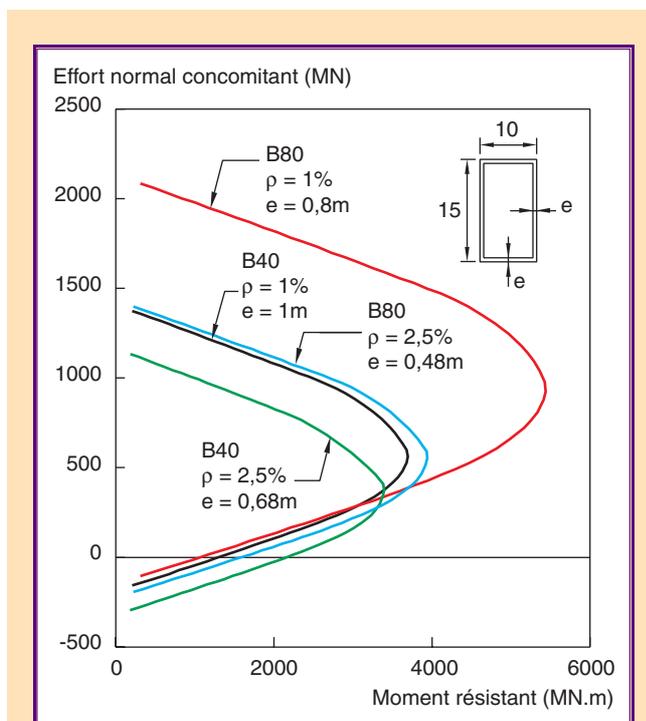


Fig. 10 - Diagrammes d'interaction ELU pour les quatre solutions de l'exemple 1.

les parements extérieurs). Les prix du mètre cube de B40 sont généralement compris entre 800 et 1 100 F (120 à 170 €) sur les chantiers courants. Ce prix intègre de manière plus ou moins parfaite les frais fixes, indépendants de la quantité de béton coulé. On utilise ici un prix moyen de 152 €/m<sup>3</sup>. Pour le B80, des prix entre 1 400 et 1 800 F/m<sup>3</sup> (213 à 275 €/m<sup>3</sup>) ont été rencontrés. On choisit un prix moyen de 245 €/m<sup>3</sup>, étant entendu que ce prix devrait être plus faible sur un gros chantier avec de grandes piles. Le prix du kilogramme d'armature HA est actuellement d'environ 5 à 6 F (0,76 à 0,91 €/kg). On choisit d'utiliser 0,91 €/kg. Le coût matériau total des quatre solutions est présenté dans le tableau VII. La solution B40 ferrailée à 1 % est assez nettement plus compétitive que la solution en B80 avec 1 %. La solution en B40 avec 2,5 % est légèrement moins intéressante, mais du même ordre de grandeur. Enfin, la solution en B80 avec 2,5 % d'acier est plus économique que la solution de référence, même si la différence est faible.

**TABLEAU V**  
Récapitulatif des 4 solutions avec leurs efforts de calculs

Béton	ρ	Épaisseur	N <sub>ELU</sub> (MN)	M <sub>ELU</sub> (MN.m)
B40	1 %	1,00 m	339,4	3 300
B40	2,5 %	0,68 m	304,1	3 300
B80	1 %	0,80 m	317,5	3 300
B80	2,5 %	0,48 m	281,2	3 300

**TABLEAU VI**  
Bilan matière par rapport à la solution B40 ferrailée à 1 %

Solution	Volume de béton	Poids d'armature
B40 : 2,5 %	- 30,1 %	+ 74,7 %
B80 : 1 %	- 18,6 %	- 18,6 %
B80 : 2,5 %	- 49,8 %	+ 25,4 %

En faisant varier le coût unitaire de l'acier entre 4 et 7 F (0,67 à 1,07 €/kg) afin d'examiner l'influence de cette hypothèse, on a pu montrer que, tant que le prix de l'acier est supérieur à 5,5 F (0,84 €) par kg, les tendances sont identiques. Au-dessous de 0,84 €/kg, les solutions utilisant beaucoup d'acier sont encore plus intéressantes et, notamment, la solution en B80 et 2,5 % d'acier. La solution en B40 avec 2,5 % est quant à elle intéressante seulement pour des coûts unitaires d'acier inférieurs à 0,84 €/kg. Lorsque l'on fait varier le prix unitaire du B80 entre 1 200 et 1 800 F (183 à 275 €/m<sup>3</sup>), on s'aperçoit que la solution en B80 ferrailée à 1 % n'est économique que pour un prix unitaire du mètre cube de béton inférieur ou égal à 1 300 F (198 €). La solution B80 à 2,5 % d'acier

**TABLEAU VII**  
Comparaison des coûts matières des différentes solutions

Solution	Quantité béton (m <sup>3</sup> )	Coût du béton (k€)	Quantité d'acier HA (t)	Coût de l'acier (k€)	Coût total (k€)	Coût par rapport à la solution B40 : 1 %
B40 : 1 %	3 450	525	269,1	245	770	-
B40 : 2,5 %	2 411	366	470,2	428	794	+ 3 %
B80 : 1 %	2 808	688	219,0	199	887	+ 15 %
B80 : 2,5 %	1 731	424	337,5	307	731	- 5 %

est, quant à elle, intéressante jusqu'à près de 1 800 F (275 €/m<sup>3</sup>). Avec d'autres valeurs de prix unitaire d'acier, ces tendances sont conservées.

Par ailleurs, la solution B80 ferrailée à 1 % comporte des parois d'épaisseur moyenne 0,84 m. Avec une telle épaisseur, l'échauffement d'un béton B80 lors de la prise devient un problème majeur, en raison des risques de pathologie ultérieure par formation différée d'ettringite, si le problème n'a pas été anticipé notamment en termes de formulation du matériau [17]. Il est à noter que ce risque existe également dans la solution B40, avec des parois d'épaisseur moyenne de 1 mètre.

Si la portée de ce cas d'école est évidemment restreinte, l'illustration des ordres de grandeur est néanmoins éloquent. En réalité, les combinaisons d'efforts sont plus complexes, et il est donc plus difficile d'optimiser les sections, car on doit placer des triplets d'effort normal et de moments (N, My, Mz) dans l'ellipsoïde de résistance de la section. L'hypothèse selon laquelle les efforts de flexion restent constants, même si la géométrie de la pile change, est assez simpliste. Par exemple, les efforts du vent dépendent de la fréquence de la structure, qui pour les premiers modes de fléau (pour une construction par encorbellement) dépendent assez directement de la rigidité de la pile. Ainsi, les solutions présentées avec une quantité d'acier constante (1 % ou 2,5 % dans l'exemple qui précède), montrent qu'on peut diminuer la section de la pile d'environ 20 % en passant du B40 au B80. Dans les cas étudiés, cela représente aussi une chute de l'inertie I d'environ 20 % : la rigidité EI est alors conservée, et les efforts dus au vent aussi.

On note en outre que les effets du second ordre sont conditionnés par la résistance en traction, par la valeur du module d'Young, et surtout par la quantité d'armatures (à géométrie de coffrage et caractéristiques du béton constantes, plus il y a d'acier et mieux on contrôle les effets du second ordre). En fin de compte, il se dégage de cet exemple que, suivant la géométrie de la pile et les actions extérieures, une solution en BHP peut ou non s'imposer par des économies sur le coût des matériaux. Cependant, lorsque le taux de compression est important, et à condition de ferrailer suffisamment, la solution BHP conduit à des gains substantiels sur les quantités de matériau, et à un gain en coût matériau significatif – sans changer d'ordre de grandeur.

Au-delà d'une démonstration de l'intérêt des BHP au stade du projet, le document du groupe met en évidence les questions à résoudre, lorsque l'on cherche à utiliser de façon optimisée le matériau béton dans les ouvrages d'art comportant piles et pylônes de grande hauteur :

- spécification du béton, avec choix des constituants, en fonction d'un cahier des charges forcément complexe et comportant nécessairement les rubriques « propriétés pour la mise en œuvre », « déformations thermiques gênées », « propriétés permettant d'obtenir des parements de bel aspect et durables » ;
- question de méthodes, avec leur incidence sur les déformations gênées et la rhéologie ;
- calcul au vent, en construction et en phase définitive, avec incidences sur le dimensionnement et l'économie des sections, les méthodes de contreventement provisoire, et les vérifications de stabilité ;
- organisation de l'étude béton, des convenances et de l'exécution, afin de permettre la réalisation effective de l'ouvrage, durable, et de qualité, tel qu'il a été voulu.

À la lumière des défauts rencontrés et des difficultés avérées sur les chantiers ou projets, l'existence des fissures de retrait (thermique) empêché reste le principal problème reconnu, qu'il convient en fait de replacer dans sa véritable dimension : dans quelle mesure cette fissuration est-elle pathologique, ou acceptable vis-à-vis de son incidence sur la durabilité ? et dans quelle mesure l'exothermie initiale dont ces fissures témoignent, reste-t-elle, par les précautions complémentaires qui auront pu être prises, un problème maîtrisé vis-à-vis du risque de formation différée d'ettringite ?

Le document ne répond pas de façon unique et directe à ces questions, qui recouvrent la formulation détaillée du matériau, le détail de la méthode d'exécution, la définition fine du ferrailage, et qui ont des incidences en termes de contrôle puis de surveillance et d'inspection de l'ouvrage. Hormis ce problème le plus fréquent, et qui n'est pas finalement spécifique des BHP, la réflexion met en évidence des avantages potentiels forts liés à l'utilisation de bétons à hautes performances pour la réalisation d'ouvrages de grande hauteur (fig. 11).

En effet, il est particulièrement intéressant de réduire la masse et le maître couple du tablier et des piles d'un ouvrage de grande hauteur, car les effets dynamiques ou non linéaires sont proportionnels à ces deux paramètres. Il faut donc faire souple, léger et résistant. L'acier répond évidemment à ce cahier des charges, mais il reste un matériau cher dont l'emploi est limité aux très longues portées.



*Fig. 11 -  
Construction du  
viaduc de Millau.  
Piles en B60  
(cliché LCPC).*

Le BHP avec un pourcentage élevé d'armatures apparaît réellement comme un « nouveau matériau », intermédiaire entre le béton classique et l'acier, qui permet d'optimiser le projet sous tous ses aspects : résistance, durabilité et coût. Il autorise ainsi :

- une économie nette de matériau, à fonctionnalité identique, induisant une économie sur les fondations, encore améliorée dans le cas d'une optimisation du tablier béton en BHP ; cette économie se déduit à la fois du dimensionnement sous les charges routières et le poids propre, et de la vérification (parfois au moins aussi critique) de la stabilité et de la tenue au vent ; l'économie globale nécessite cependant d'accroître sensiblement le taux et/ou la contrainte de travail du ferrailage, pour concilier souplesse et résistance. Mais les caractéristiques rhéologiques du BHP (bien formulé) permettent sa bonne mise en œuvre, même avec un taux très élevé d'armatures ;
- la possibilité d'atteindre, au moins aussi facilement qu'avec des bétons ordinaires, des spécifications sévères pour la mise en œuvre, liées aux méthodes de transport du béton et de bétonnage ; cette possibilité, qui se traduit normalement assez directement en qualité des parements (esthétique et durabilité), exige cependant une bonne anticipation des questions de méthodes dès la spécification du béton, et la prise en compte des aspects de rhéologie dès la phase d'étude, qui s'en trouve naturellement rallongée ;
- la possibilité d'atteindre, pour des enrobages et des conditions d'environnement comparables, une durabilité clairement améliorée ; cette possibilité exigeant là encore une bonne qualité d'exécution et l'anticipation des questions de méthode et des effets thermiques.

## Conclusions

Plusieurs tendances se dégagent des études de variantes réalisées au sein du groupe BTHP, et confirment le retour d'expérience collecté par le groupe « économie et développement » du projet national, ou celui lié aux expériences de passages supérieurs autoroutiers valorisant le BHP, tant en France [18-20] qu'à l'étranger [21, 22]. Si l'on effectue une comparaison des structures de référence en B30 ou B40, avec leur version optimisée en B80FS, à fonctionnalité identique, il en ressort que :

- ❶ l'élancement des structures en B80 est toujours sensiblement plus élevé que celui des structures en B40, l'usage optimisé des matériaux conduisant à des gains de volume de 15 à 50 % environ ;
- ❷ le coût matière initial de la solution en B80 se situe donc généralement légèrement en dessous de celui de la solution de référence (entre 0 et 10 % de moins). Les gains induits, pouvant être plus importants, sont difficiles à quantifier dans le cas général ; ce sont cependant eux qui seront souvent déterminants vis-à-vis du coût initial de l'ouvrage ;
- ❸ la valorisation du B80 exige absolument la mobilisation de compressions de niveau assez élevé : arc suffisamment surbaissé, caisson suffisamment élancé (ce qui n'est vraiment adapté que pour un ouvrage de portée suffisante), pile suffisamment haute ou chargée, etc. Au contraire, si les formes

ne sont pas modifiées, la résistance en traction et la contrainte de cisaillement limite deviennent critiques, ce qui exclut une valorisation satisfaisante de bétons de résistance plus élevées (B100 et au-delà) ;

④ l'usage de BHP avec fumée de silice, compte tenu d'un fluage réduit, conduit à des réductions de déformations différées et des redistributions d'effort moindres, ce qui constitue un avantage significatif dans tous les cas étudiés ;

⑤ en construction ou sous charges de vent, la stabilité des solutions en BTHP est généralement améliorée ;

⑥ enfin, la prise en compte le plus tôt possible des questions de méthodes est tout à fait essentielle pour permettre une valorisation économique complète d'une solution en B(T)HP dès le coût initial.

---

*Remerciements.* Cet article constitue la première partie d'une synthèse des travaux du groupe de travail BTHP du projet national BHP 2000, animé par F. Toutlemonde entre 1995 et 2002. Outre la contribution des auteurs co-signataires, les travaux présentés se sont appuyés sur les stages de H. Charfi et L. Nakhle, étudiants du CHEC, sur les calculs de J. Lefèvre et G. Codis (SETRA) et sur les contributions rédactionnelles de P. Runfola (LRPC de Nice), R. Le Roy et L. d'Aloïa (LCPC, division « Bétons et composites cimentaires »). Les auteurs remercient également D. Brazillier, directeur technique du projet national BHP 2000, pour son soutien au cours de ces travaux.

---

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] HELLAND S., Utilization of HPC, *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symp. on the utilization of High Strength/High Performance Concrete*, LCPC – Presses de l'ENPC, Paris, **1996**, pp. 67-73.
- [2] de LARRARD F. et al., Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **spécial XIX**, mai **1996**, 162 p.
- [3] MALIER Y. ed., *High Performance Concrete. From material to structure*, E&FN SPON **1992**.
- [4] *Les Bétons Hautes Performances. Guide pratique à l'attention des architectes et des maîtres d'œuvre*, guide réalisé par le Projet National BHP 2000, édité par l'École Française du Béton c/o CimBéton, collection de l'IREX, février **2001**.
- [5] GILLET G. et al., Le viaduc de Verrières, *Travaux*, **774**, **2001**.
- [6] LACAZE J.-J. et al., A89. Le viaduc du pays de Tulle, *Travaux*, **782**, **2002**.
- [7] MARTIN J.-P., BUONOMO M., SERVANT C., Le viaduc de Millau, *Travaux*, **794**, **2003**.
- [8] LETEY C. et al., Franchissement du Rhône. Le pont haubané de Beaucaire Tarascon, *Travaux*, **760**, **2000**.
- [9] MORAND P. et al., La construction des piles du pont de Rion-Antirion en Grèce : des travaux de titans, *Travaux*, **782**, **2002**.
- [10] BOYADJIAN G. et al., Le viaduc du Chavanon. 10 000 tonnes de légèreté, *Travaux*, **768**, **2000**.
- [11] DEMARE A. et TREFFOT G., Second pont sur le Rhin au sud de Strasbourg. Les études de faisabilité des bétons à hautes performances, *Ouvrages d'Art*, **37**, **2001**.
- [12] TAVAKOLI F., Jonches. Une méthode innovante de poussage qui n'oublie pas le BHP, *Bulletin annuel de l'AFGC*, **5**, janvier, **2003**, pp. 13-15.
- [13] CHUNIAUD J.-P. et al., Le pont sur le Bras de la Plaine (île de la Réunion). Un ouvrage d'exception dans un site grandiose, *Travaux*, **782**, **2002**.
- [14] FRÉMONT G. et al., Les viaducs en arc du Crozet, *3<sup>e</sup> conférence internationale sur les ponts en arc ARCH' 01*, Paris, France, 19-21 septembre 2001, C. Abdunur ed., Presses de l'ENPC, **2001**, pp. 851-856.
- [15] LE ROY R., Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances, *Études et recherches des LPC*, **OA 22**, **1996**.
- [16] LÉGERON F., D'ALOÏA L., LE ROY R., TOUTLEMONDE F., RUNFOLA P., *Valorisation des bétons à hautes performances dans les piles et pylônes de grande hauteur des ouvrages d'art*, guide technique LCPC, juin, **2003**.
- [17] DIVET L., Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans les bétons ? Point sur les normes actuelles et quelques recommandations, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **240**, **2002**, pp. 87-94.

- [18] BRAZILLIER D. et al., New developments in standard bridge design using H.P.C. (B80), *Proc. of the Int. Conf. on New Technologies in Structural Engineering, FIP'97*, Lisbon, **1997**, pp. 131-138.
- [19] BARBAUX et al., PS mixte en BHP à connexion différée. Le PS 13 sur A85, *Ouvrages d'Art*, **36**, **2000**.
- [20] GABRIELLI P.-P., Le programme de développement du béton haute performance pour la construction des ouvrages d'art en Charente, *Travaux*, **755**, **1992**.
- [21] SALEH M.A. & TADROS M.K., Design and construction of the first US high performance concrete bridge, *Proc. of the 13<sup>th</sup> FIP Congress*, **1998**, pp. 391-392.
- [22] COULOMBE L.-G., Utilization of High Performance Concrete in Bridge Construction at the Québec Ministry of Transportation, *Structural Engineering World Wide*, Paper reference T182-3, Structural Engineers World Congress (SEWC '98), 21-23 juillet, San Francisco (Ca), USA, Elsevier Science Ltd, **1998**.

### **Rapports d'études du groupe BTHP en relation avec cet article**

Des informations détaillées sont disponibles dans les rapports d'études produits par le groupe, cités ci-après et disponibles auprès de l'IREX, de la DRAST, ou de leurs auteurs :

- *Optimisation d'un pont-caisson en BHP 80. Viaduc de Mesnil-Le-Roi. Autoroute A14, tome I (version 2)*, A. Piquet, H. Charfi, Dumez-GTM, juin **1997**.
- *Optimisation d'un pont-caisson en BHP 80. Viaduc de Mesnil-Le-Roi. Autoroute A14, tome II*, A. Piquet, L. Nakhle, Dumez-GTM, janvier **1998**.
- *Optimisation d'un pont en arc en B40 et en B80*, F. Légeron, G. Codis, J. Lefèvre, E. Bouchon, SETRA, mars **1998**.
- *Valorisation des bétons à hautes performances dans les piles et pylônes de grande hauteur des ouvrages d'art*, F. Légeron, L. D'Aloïa, R. Le Roy, F. Toutlemonde, P. Runfola, SETRA-LCPC-LRPC de Nice, novembre **2001**.

### **Bibliographie complémentaire sur les travaux du groupe BTHP**

- TOUTLEMONDE F., BRAZILLIER D., de LARRARD F., *Recent advances in France in High Performance Concrete technology*, Structural Engineering World Wide, Paper reference T185-3, Structural Engineers World Congress (SEWC' 98), 21-23 juillet, San Francisco (Ca), États-Unis, Elsevier Science Ltd, **1998**.
- TOUTLEMONDE F., *Bétons à très hautes performances. 1. Évaluation de points critiques du règlement pour les BTHP. 2. Intérêt des BTHP pour les ouvrages d'art*, séminaires de clôture des projets nationaux CALIBE, BEFIM et BHP 2000 « Les nouveaux bétons d'aujourd'hui et de demain », Paris, 30-31 janvier, Marseille, 7-8 mars, Strasbourg, 20-21 mars, **2001**.
- TOUTLEMONDE F., *Application of High Performance Concrete to bridge structures: case studies*, conférence invitée pour le séminaire Jadwal organisé par l'Association indonésienne des Ingénieurs de Structures sur les bétons à hautes performances et la mise en œuvre des bétons sous l'eau, Djakarta, 6 mars **2001**.
- LÉGERON F., TOUTLEMONDE F., BOUCHON E., LEFÈVRE J., CODIS G., *Application of High Performance Concrete in an arch of moderate span. Comparative study*, 3<sup>o</sup> conférence internationale sur les ponts en arc ARCH' 01, Paris, France, 19-21 septembre, C. Abdunur ed., Presses de l'ENPC, **2001**, pp. 701-707.
- TOUTLEMONDE F., LÉGERON F., BRAZILLIER D., *Rational structural design using HPC in some typical bridge structures*, 6<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 16-20 juin 2002, Leipzig, König, Dehn & Faust eds, vol. I, **2002**, pp. 797-812.
- TOUTLEMONDE F., de LARRARD F., BRAZILLIER D., *Structural application of HPC: a survey of recent research in France*, conférence plénière invitée, 6<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 16-20 juin 2002, Leipzig, König, Dehn & Faust eds, vol. I, **2002**, pp. 17-44.
- LÉGERON F., D'ALOÏA L., LE ROY R., TOUTLEMONDE F., RUNFOLA P., *Valorisation des bétons à hautes performances dans les piles et pylônes de grande hauteur des ouvrages d'art*, guide technique LCPC, juin, **2003**.