

Partie 4 – Traitement de l'information

UN RETOUR D'EXPÉRIENCE DE 8 ANS EN CORSE SUR LA MAÎTRISE DU COMPORTEMENT D'OUVRAGES D'ART EN BÉTON PRÉCONTRAIT

8 YEARS' FIELD EXPERIENCE IN CORSICA ON THE CONTROL OF BEHAVIOUR OF PRESTRESSED CONCRETE ENGINEERING STRUCTURES

Delphine RAFFARD^(a*), Loïc MORVAN^(b), Michel VIRLOGEUX^(c)

a. ARGOTECH, 200 rue Michel de Montaigne - Créativa Bat. C2 -
84911 Avignon cedex 9 – France

b. Collectivité Territoriale de Corse, Hôtel de la Collectivité Territoriale de Corse - Direction des routes –
Service ouvrages d'art - 22, cours Grandval - BP 215 - 20187 Ajaccio Cedex 1 – France

c. Michel VIRLOGEUX Consultant SARL, 24 rue de la division Leclerc - 78830 Bonnelles – France

* Auteur correspondant : delphine.raffard@argotech-sas.fr

RÉSUMÉ

Les ouvrages en béton précontraint avec une conception architecturale avancée demandent une maîtrise des comportements différés afin d'estimer les déformations et les pertes de précontrainte. Le développement de tels ouvrages en Corse a permis de mettre en lumière la nécessité impérieuse de mettre en place une modélisation fine du comportement dès la conception associée à un contrôle de l'ouvrage par une instrumentation judicieuse et efficace dans son exploitation.

ABSTRACT

The concrete bridges prestressed with an advanced architectural design ask for a control of the behavior postponed to estimate the losses of prestressed. The development of such works in Corsica allowed to bring to light the compelling need to set up a fine modelling of the behavior from the design associated with a control of the bridge by a sensible and effective instrumentation in its exploitation.

Mots-clés : Ponts précontraints. Comportement différé. Instrumentation. Modélisation.

1. INTRODUCTION

Les développements architecturaux des ouvrages d'art audacieux s'intégrant dans l'environnement conduisent souvent à des structures légères en béton précontraint, utilisant des bétons à hautes caractéristiques. Ces ouvrages se placent le plus souvent à la limite des préconisations réglementaires usuelles. Les déformations différées du béton vont alors être le paramètre sensible : celles-ci vont influencer la déformation de l'ouvrage donc son comportement et les pertes de précontrainte.

Le développement en Corse de tels ouvrages d'art a débuté il y a une dizaine d'années. Le pont de Vecchio en est un exemple. L'appel d'offre a été mené de façon classique avec une instrumentation de contrôle et sans études précises du comportement du béton. Ceci va induire des divergences sur les prédictions de comportement et une remise en cause importante dans l'approche de modélisation et de suivi du comportement à long terme.

2. L'EXPÉRIENCE DU PONT DE VECCHIO

2.2. Description sommaire de l'ouvrage

Le pont, construit entre 1995 et 1997, avait pour objet de remplacer un ouvrage en maçonnerie étroit et en mauvais état, et d'améliorer le tracé de la route dans ce secteur. En outre, il est situé à proximité du pont ferroviaire construit par Gustave Eiffel dans un site remarquable.

Ceci a conduit les concepteurs (EEG devenu ARCADIS et B. Mikaelian architecte) à prévoir un ouvrage avec une grande portée centrale de manière à dégager la vallée et éviter des appuis dans la brèche.

L'ouvrage comprend une grande travée centrale, de 137.5 m en alignement droit et 2 travées de rive courtes de 42.25 m très courbes (Figure 1). C'est un ouvrage élégant à âmes ajourées inclinées.

La précontrainte du tablier est constituée de 4 familles : des câbles de fléaux intérieurs au béton en 7T15, des câbles de continuité intérieurs au béton en milieu de travée centrale, des câbles extérieurs en 19T15, des barres de précontrainte verticale, de diamètre 36, 40 ou 50 mm dans les panneaux d'âmes.

2.2. Les évolutions dans le temps et ses conséquences

Dans le cadre du suivi de son patrimoine, le maître d'ouvrage a constaté que le tablier prenait une flèche bien plus importante que celle estimée par les calculs d'exécution : 111 mm mesurés après 8 ans alors que 57 mm étaient calculés pour la fin de vie (Figure 2). Notons que les flèches mesurées lors des essais de chargement réalisés à la mise en service étaient inférieures aux flèches théoriques ! Une instrumentation, permettant des mesures de déformations

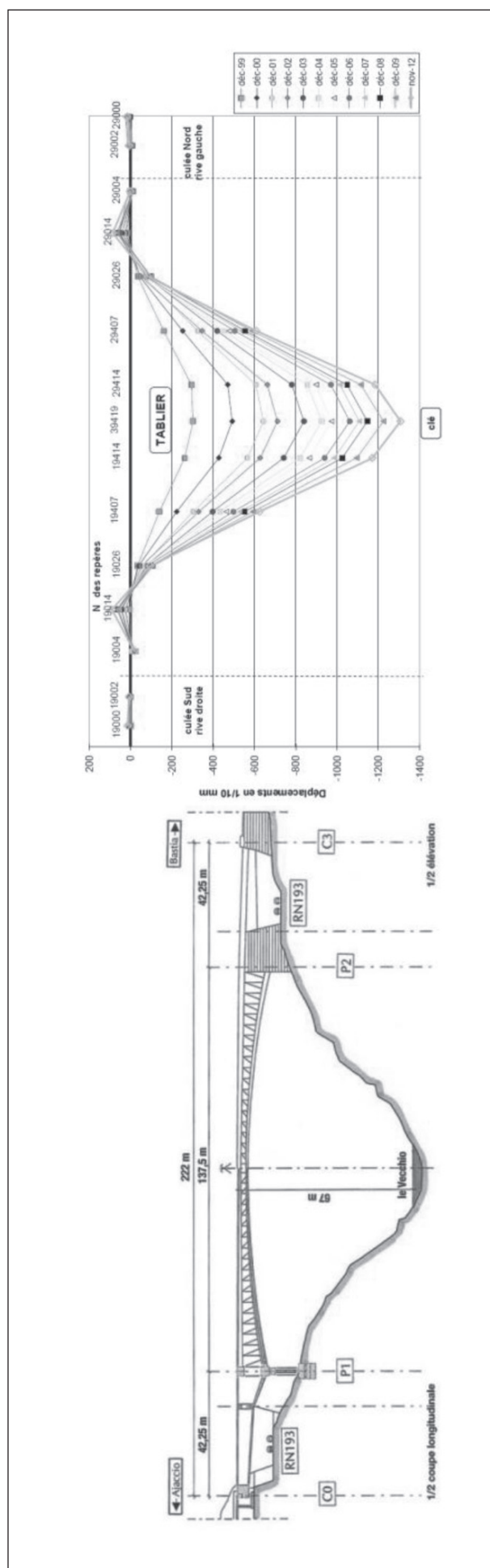


Figure 1 : Schéma du pont de Vecchio

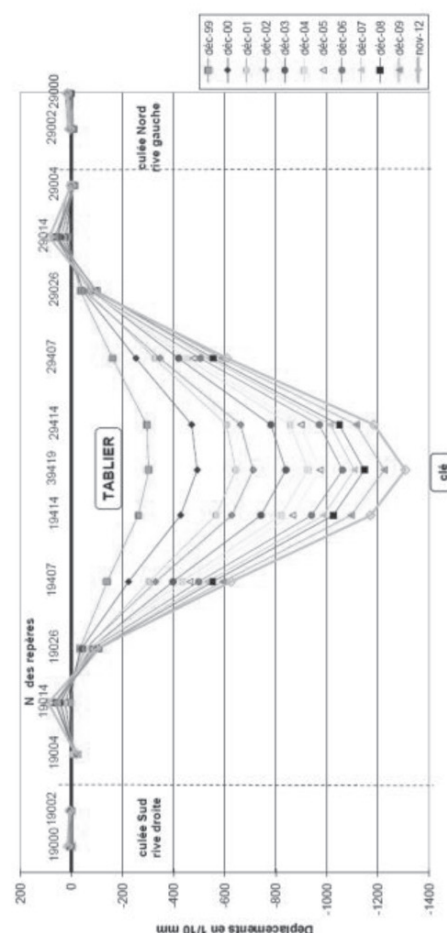


Figure 2 : Evolution des flèches avec le temps



Figure 3 : Le pont d'ABRA

et de températures, avait été intégrée à l'ouvrage, mais elle n'a pas été exploitée lors des essais de chargement ni pendant les premières années du suivi de l'ouvrage.

2.3. Conclusion

Des études d'exécution pointues avaient été menées sous ST1. Les modèles utilisés définissaient le béton suivant le règlement BPEL 91 [1]. L'origine de la forte divergence entre l'évolution des flèches mesurées et celles calculées a été recherchée. Deux questions se sont alors posées : le comportement mécanique de cette structure aux âmes ajourées est-il mal appréhendé ou provient-elle de la rhéologie du béton ? Les résultats de flèches importantes dans le temps et les conclusions de l'étude réalisée, 8 ans plus tard, sur les bétons du pont d'ABRA ont permis de remettre en doute les modèles du béton, sans pour cela remettre en cause le modèle de calcul et le fonctionnement de l'ouvrage à âmes ajourées. L'inexploitation de l'instrumentation intégrée à l'ouvrage n'a pas permis au Maître d'ouvrage d'appréhender le comportement de l'ouvrage et son fonctionnement. Ces points vont être pris en compte lors de la construction du pont d'ABRA.

3. LE PONT D'ABRA

3.1. Description sommaire

Vu l'enthousiasme suscité par le pont du Vecchio, le maître d'ouvrage a retenu un tablier aux caractéristiques semblables pour franchir un cours d'eau à proximité d'un pont génois du 17^e siècle, dans le cadre de la rectification du tracé d'une section de route de l'axe Ajaccio – Bonifacio. Si les dimensions sont plus modestes (204 m contre 222), les âmes sont élégies sur toute la longueur du tablier et la distribution des trois travées (Figure 3), devant s'adapter à la topographie, est différente.

3.2. Le CCTP et l'appel d'offre relatif à l'instrumentation

Compte tenu du caractère exceptionnel du pont et des premières constatations révélées par le suivi du pont du

Vecchio, le maître d'ouvrage a souhaité instrumenter la structure du tablier pour pouvoir assurer la maintenance. L'objectif était aussi d'appréhender les déformations différées et la redistribution des efforts pour améliorer les corrélations entre le suivi expérimental et les résultats des études d'exécution.

Le cahier des charges imposait d'une part, que la mission démarre dès la construction de l'ouvrage et d'autre part, que la définition, la mise en œuvre et l'interprétation de l'instrumentation soient réalisées par un groupement devant disposer en propre de compétences en matière d'instrumentation, de conception d'ouvrages d'art précontraints, de comportement d'ouvrage et de calcul de structures du Génie civil.

3.3. Instrumentation de l'ouvrage

Le groupement a choisi de concentrer l'instrumentation sur des sections représentatives fonction de la complexité structurelle, de la symétrie et de l'exposition de l'ouvrage, plutôt que de la répartir le long de la structure (figure 4). L'instrumentation a alors été placée :

- Pour le tablier : en deux zones de 3 voussoirs, une près de la clé, l'autre près d'une pile.
- Pour chacune des deux piles : en deux zones, une sous le voussoir sur pile, l'autre à mi-hauteur.
- Pour chacune des deux culées : au niveau des appareils d'appuis.

Trois types de mesure sont réalisés via 250 points intégrés à l'ouvrage, la plupart noyés dans le béton :

- Des mesures de la température permettant l'obtention des gradients de température et de leur évolution en tout point des sections (données d'entrée du modèle thermomécanique ANSYS permettant la déduction de la redistribution des T°C sur l'ensemble de la structure).
- Des mesures de l'évolution du fluage par la mesure des réactions d'appuis sur culée. Les réactions d'appui dépendent essentiellement des effets thermiques dans l'ouvrage, de la redistribution des efforts par fluage et de l'effet des pertes de précontrainte.
- Des mesures des déformations liées au retrait, au fluage et à la température par des mesures extensométriques permettant le suivi de l'évolution structurelle du béton et une comparaison aux données issues des modèles de calcul utilisés pour la conception de l'ouvrage.

L'ensemble des capteurs est relié à deux centrales d'acquisition autonomes et interrogeables à distance. L'ensemble

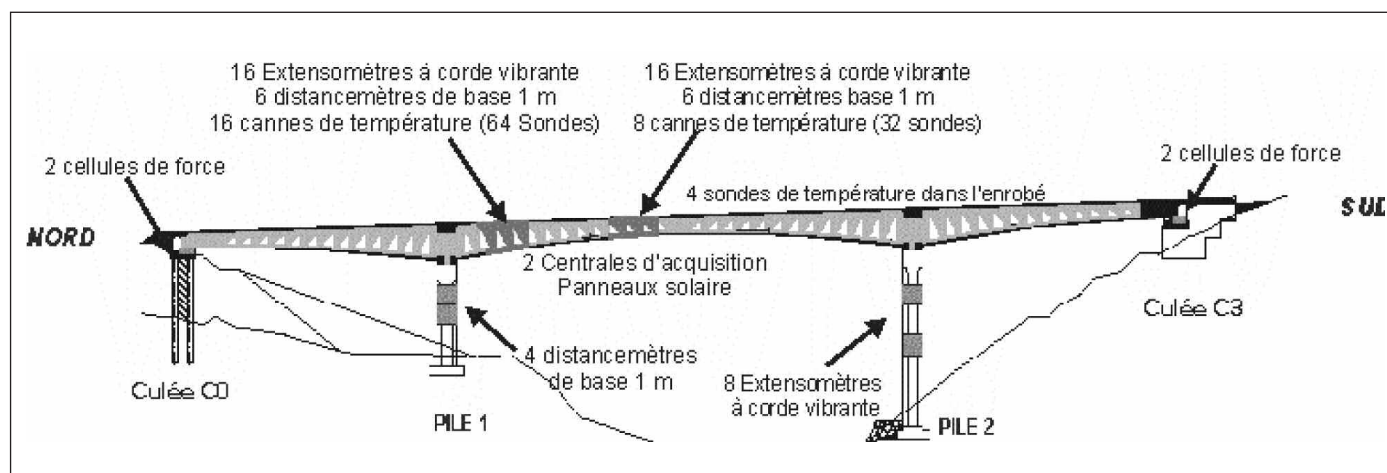


Figure 4 : Pont d'ABRA Sections instrumentées

des données y est stocké, pour ensuite être transféré sur une base de données distante et traité. Les acquisitions ont débuté dès la pose des capteurs, et ce afin de suivre les différentes phases de construction de l'ouvrage, voire d'apporter une aide à certaines opérations (ex. : clavage, mise en tension) [2].

3.4. Etudes d'exécution de l'ouvrage

Les âmes n'étant pas continues, l'effort tranchant ne peut pas cheminer par cisaillement de façon classique tout au long du tablier. C'est pourquoi l'étude du comportement général à l'effort tranchant d'une poutre à âmes ajourées a été faite en se basant sur la théorie du « coin élastique » tronqué et incorporée dans le programme ST1 du Setra, « logiciel à barres ». Ce logiciel permet la prise en compte du phasage de construction et des effets du fluage du béton, ce que n'aurait pas permis un programme aux éléments finis de type coque. Au titre du contrôle externe, un modèle aux éléments finis à l'aide du code de calcul « ANSYS » a permis de valider sur des cas unitaires la méthode de calcul utilisée.

3.5. Etude du béton

Sur proposition du groupement Instrumentation, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a eu pour mission de définir au mieux la rhéologie du béton (étude mécanique des roches et évaluation du fluage du béton sous différentes hypothèses). Les conclusions de l'étude [3] mettent en évidence un décalage important entre le modèle réglementaire et les mesures (module d'élasticité réglementaire plus élevé, déformations différées sous estimées) ; elles indiquent que pour ce type de béton, il convient d'utiliser les modèles BPEL-BHP avec des corrections afin d'estimer correctement les déformations instantanées et différées.

4. COMPORTEMENT DU PONT D'ABRA

Afin d'exploiter les mesures et de permettre la comparaison entre les modèles de calcul et les mesures, l'entreprise

RAZEL a fourni les résultats des contraintes ou efforts issus du modèle éclaté ST1 aux points d'implantation des capteurs pour différents états correspondant aux cycles de construction. Pour les épreuves de chargement, nous avons également disposé des résultats obtenus par le modèle ANSYS en ces points. Pour comparer avec les résultats des calculs, les déformations mesurées ont été converties en contraintes avec un module théorique de 37 670 MPa et les efforts mesurés ont été convertis en tonnes avec $g=9,81 \text{ ms}^{-2}$.

4.1. Essais de chargement vu de l'instrumentation

Les essais de chargement ont eu lieu le 22/07/2008 de 5h à 11h, donc sur une plage horaire avec une grande variation de température. Durant les essais, le comportement de l'ouvrage sans charge n'est plus accessible et donc la référence de l'ouvrage sans charge sous sollicitations thermiques n'est donc plus restituée. Pour pouvoir interpréter les variations d'information des capteurs durant cette phase, il est nécessaire de procéder à une reconstruction de ce comportement. Pour ce faire, on choisit une journée proche de celle des tests, journée avec une variation thermique la plus proche possible. La figure 5 montre cette reconstruction en couleur verte ainsi que les 4 cas de chargements de la structure pour les capteurs de la culée C0. Au niveau des appuis les résultats issus de ST1 et d'ANSYS sont similaires. Le tableau 1 donne les comparaisons de charge au niveau des appuis (culées et piles)

	CAS 1 chargement=1560 kN		CAS 2 chargement=2600 kN	
	calcul ST1	Mesures	calcul ST1	Mesures
culée C0	738	702	170	175
pile P1	916	960	1742	1314
pile P2	-89	-133	815	746
culée C3	-9	-3	-144	-140
Total	1556	1526	2583	2095

Tableau 1 : Résultats au niveau des appuis (en kN)

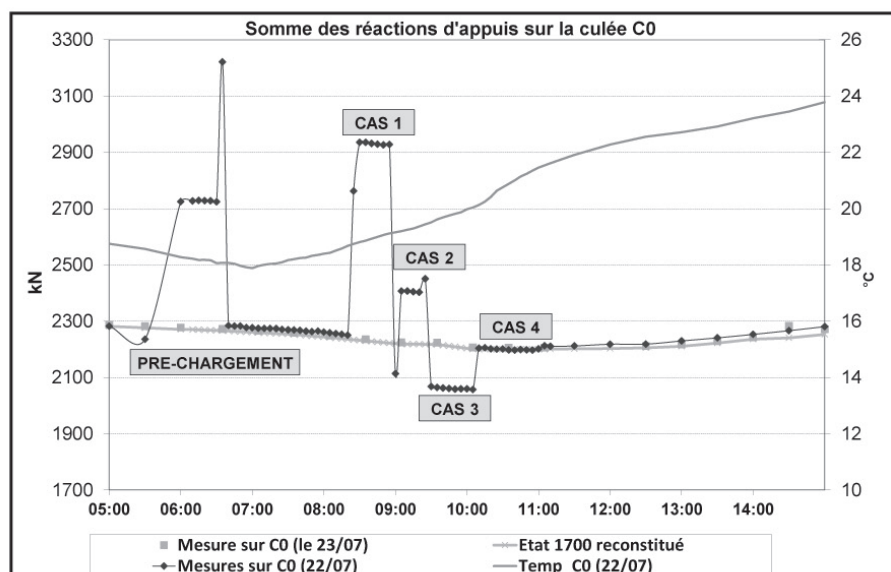


Figure 5 : Réactions d'appuis sur la culée C0

pour les 2 premiers cas de chargement. La modélisation par ST1 et les mesures donnent des résultats concordants.

Au niveau des hourdis supérieurs et inférieurs, les mesures et les modèles ST1/ANSYS concordent pour les points dans l'axe de l'ouvrage ou au niveau des encorbellements pour les 4 cas de chargement. (Figure 6).

Par contre pour les points situés au droit des âmes, le modèle éléments finis ANSYS est plus adapté que le modèle à barres éclaté. La Figure 7 illustre la pertinence du modèle ANSYS, seul capable d'appréhender le comportement transversal. Le modèle RdM ST1 ne permet pas, par construction, de décrire ces effets (le profil est « plat »). En conclusion, les mesures dans les différents éléments de la structure y compris âme ajourée, permettent d'affirmer que l'ouvrage est bien appréhendé par la modélisation surtout par ANSYS.

4.2. Le comportement différé vu de l'instrumentation

Le comportement différé est construit de la façon suivante : à partir des données instantanées, on efface les fluctuations de température journalières en prenant des moyennes sur la

journée. La Figure 8 donne en exemple l'évolution des déformations d'un capteur et l'évolution de la température moyenne sur 5 ans. On remarque clairement l'influence de la température sur le comportement de l'ouvrage et surtout l'accroissement des déformations avec le temps. Les déformations différées sont obtenues en faisant des moyennes annuelles des informations des capteurs. Bien qu'étant au début de la vie de l'ouvrage, nous allons montrer en prenant un exemple, comment nous comparons les prédictions du calcul aux déformations enregistrées. L'exemple est une jauge du voussoir 3 (V3-J3) et une jauge en même position du voussoir 11 (V11-J3). Les différences entre ces deux jauges résident, d'une part, dans la valeur de la contrainte locale et son historique et d'autre part dans la différence d'âge du béton

La Figure 9 montre l'historique du chargement obtenu par ST1. Au niveau de V3-J3 la contrainte passe par un pic à la mise en tension puis diminue progressivement l'état final. C'est le contraire pour V11-J3 : la contrainte reste croissante après la mise en tension. A la mise en service V11-J3 a un niveau de contrainte supérieur à V3-J3. On doit donc s'attendre à des déformations différées plus faibles pour V3-J3 que celles de V11-J3 et surtout à une décélération plus importante. C'est ce que montre la Figure 11. La

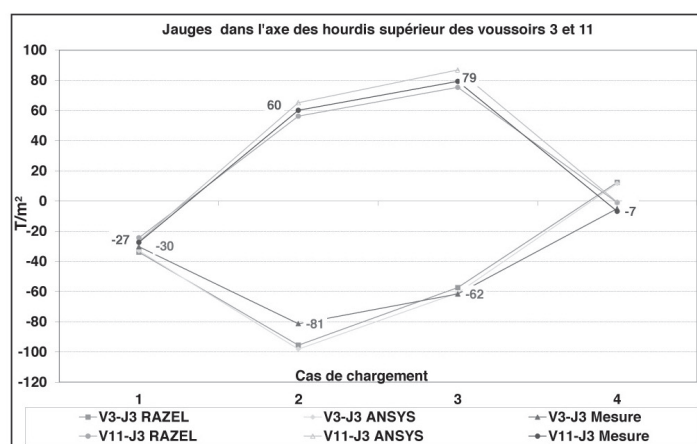


Figure 6 : Jauges dans l'axe des hourdis

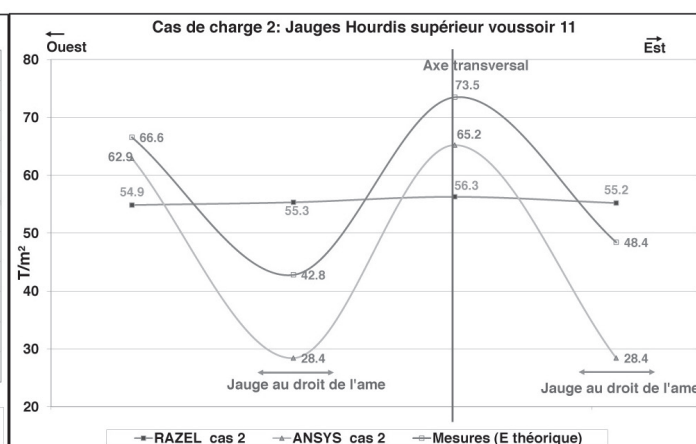


Figure 7 : Profil transversal dans le hourdis

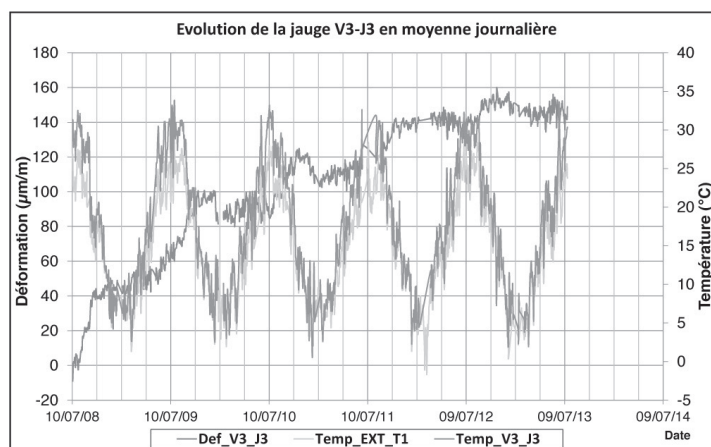


Figure 8 : Evolution des déformations sur 5 ans

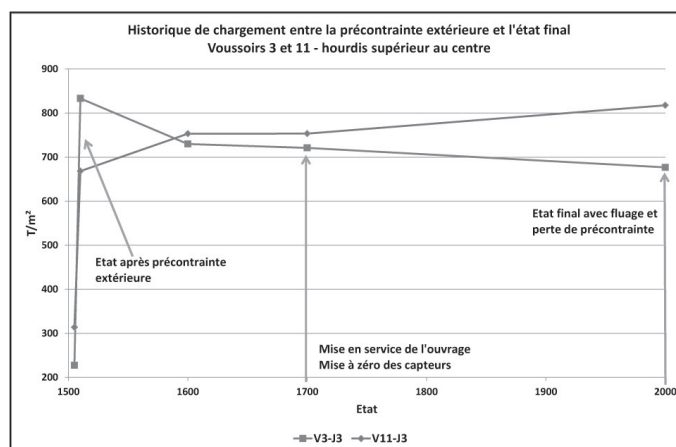


Figure 9 : Historique de chargement

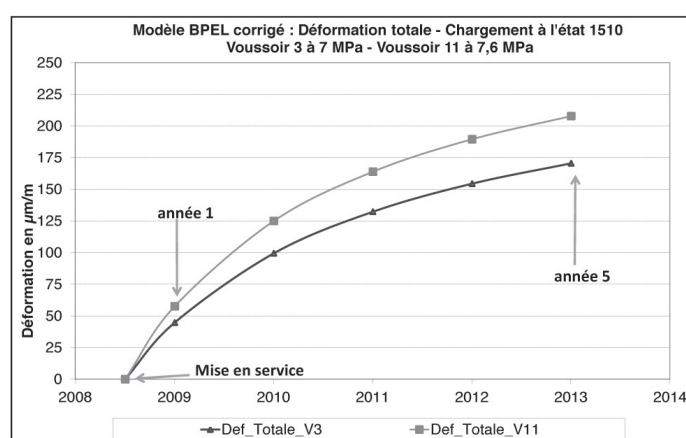


Figure 10 : Déformations totales - BPEL corrigé

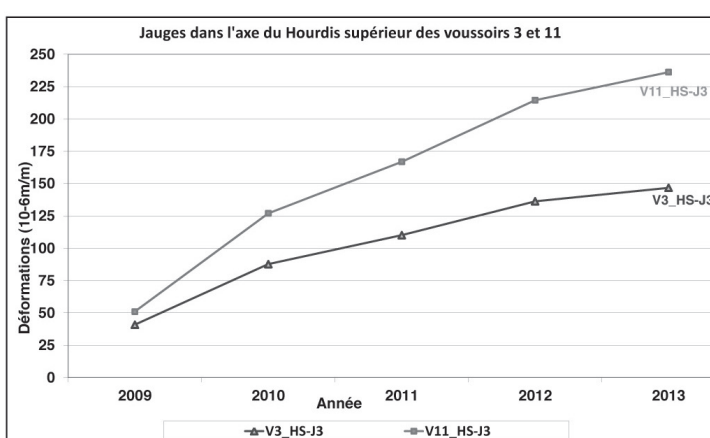


Figure 11 : Déformations différées

Figure 10 reporte la simulation du modèle béton corrigé [2] en prenant une contrainte constante (simplification) égale à 7 MPa pour V3-J3 et de 7,6 MPa pour V3-J11, valeurs moyennes entre l'état de mise en service et l'état final. Le décalage des valeurs moyennes sur la Figure 10, pour l'année 1 et l'année 5 correspond à la différence d'âge du béton. Les valeurs des déformations différées obtenues entre l'année 5 et l'année 1 sont ainsi de $126 \cdot 10^{-6}$ pour V3-J3 et de $150 \cdot 10^{-6}$ pour V3-J11, valeurs proches de celles enregistrées par les jauges (respectivement de $106 \cdot 10^{-6}$ et $185 \cdot 10^{-6}$). Cette bonne concordance entre calcul et données expérimentales a été vérifiée pour l'ensemble de l'instrumentation à cordes vibrantes.

Terminons par l'évolution des charges sur les culées (Tableau 2). Le calcul prévoit pour une augmentation des réactions d'appuis entre la mise en service et l'état final de 228 kN pour C0 et 511 kN pour C3. La mise en place de l'ouvrage durant les 2 premières années ne permet pas de

s'appuyer sur les données expérimentales de cette période. Par contre si l'on prend l'accroissement de charges entre les années 5 et 3 le ratio d'accroissement entre C0 et C3 ($16,2/43,9$) est très proche de celui donné par le calcul pour la fin de l'ouvrage ($228/511$)

En conclusion, les essais de chargement ont montré que les modélisations prédisent convenablement le comportement de l'ouvrage : le modèle éléments finis ANSYS est plus précis que le code ST1 pour rendre compte des effets transversaux. L'instrumentation interne par extensomètres à corde vibrante ainsi que les cellules de force sur culées permettent de suivre avec précision le comportement de l'ouvrage dans le temps. Cette instrumentation a montré que, bien que l'ouvrage soit récent, les déformations différées sont loin d'être négligeables, leur amplitude et leur variation sont en accord avec le modèle de comportement du béton. Les variations de réactions d'appuis mesurées sont le résultat du fluage de l'ouvrage.

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	An 5-An 3
Culée Co	-70	-32	8	22	24.2	16.2
Culée C3	8	35	55	75	98.9	43.9

Tableau 2 : Variation des réactions d'appuis (kN) sur les culées

5. RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PONT D'ABRA

L'ensemble des éléments accumulés sur le pont d'Abra a permis de montrer à l'issue d'une expertise contradictoire que les flèches mesurées sur le pont du Vecchio étaient tout à fait normales, si on prenait des hypothèses rhéologiques plus réalistes pour le béton. Les déformations différées, importantes ont une autre conséquence néfaste : la perte de tension des câbles. En 2014, le maître d'ouvrage fera placer deux câbles de précontrainte dans les réservations prévues à cet effet, dont il contrôlera les effets grâce à l'instrumentation installée 10 ans plus tôt qui a été remise en service.

6. CONCLUSION

Les différentes modélisations et les comparaisons aux déformations enregistrées ont montré que l'évolution des flèches ne provient pas d'une mauvaise prise en compte du comportement de la structure à âmes ajourées mais de la rhéologie du béton et des déformations par fluage. L'enseignement principal tiré de cette expérience est alors la nécessité d'intégrer, dès la conception de l'ouvrage, la loi rhéologique du béton réellement utilisée afin d'éviter de devoir installer prématurément de nouveaux câbles de précontrainte. Nous avons pu constater que cette loi de fluage peut être très différente de celle utilisée dans les règlements.

Cet enseignement a été pris en compte pour la construction du pont d'Altiani, ouvrage précontraint très élancé, donc

potentiellement sensible aux déformations différées. Le CCTP a prévu un calcul au stade projet avec un module d'Young dégradé, une étude de fluage conduite avec le béton choisi par l'entreprise pour caler les modèles, et un calcul de la déformation de l'ouvrage sur la base des résultats fournis par l'étude.

Une instrumentation placée judicieusement permet d'évaluer les écarts aux prédictions du modèle et donc de maîtriser le comportement global de l'ouvrage : une telle stratégie aurait permis de lever très vite les ambiguïtés apparentes survenues sur le pont de Vecchio.

Remerciements : les auteurs remercient M. MARCHETTI et M. VLEMELINX pour les développements sur ST1, P. WYNIECKI pour la modélisation par ANSYS et J.P. HENRY pour ses conseils dans la stratégie d'interprétation des mesures.

RÉFÉRENCES

- [1] Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages en béton précontraint suivant la méthode des états limites – BPEL 91 révisé 99, annexe 1 Modifiée – Déformations du béton
- [2] D. RAFFARD, Conférence technique AFGC, Instrumentation spécifique des ouvrages – Point sur les recherches effectuées, IUT de Corte, 07/10/2009
- [3] J.L. CLEMENT, Rapport LCPC « Etude et expertise du béton du pont d'Abra en Corse Rapport Final – Rev03 » du 10/12/08 et sa version provisoire du 17/10/2007.