

Prévision de l'injection de cire pétrolière dans des câbles de précontrainte extérieure

Nicolas ROUSSEL *
Fabienne FARCAS

Laboratoire central des ponts et chaussées

Michel DAUVILLIERS

Laboratoire régional des ponts et chaussées de l'ouest parisien

Abdallah BOUHLASSI
Christophe PELET

Société TOTAL

Jérémie BAUMGARTNER

Société EIFFAGE TP

Jacky BOUST

Société ARTEON

RÉSUMÉ

La protection contre la corrosion des câbles de précontrainte peut être réalisée par injection dans les gaines de précontrainte de produits souples comme les graisses, les cires pétrolières ou les résines époxydes. Cependant, avec l'augmentation de la longueur des câbles, des déformations excessives des gaines sous l'effet de pressions d'injection dépassant les pressions admissibles ont été constatées récemment. L'ambiguïté qui existe d'un point de vue réglementaire sur le choix de la géométrie de la gaine, en fonction de la section nominale des armatures constituant l'unité à protéger, est d'abord présentée. Le problème thermomécanique constitué par l'injection d'une cire pétrolière, la modélisation qui en a été effectuée et sa validation dans le cadre d'un chantier expérimental sont ensuite exposés. Enfin, le cas d'un pont courant en béton précontraint à trois travées est traité à l'aide de l'outil de calcul développé. L'incompatibilité de certaines combinaisons nombre de torons/diamètre de gaine, acceptées par la réglementation mais sources potentielles de problèmes d'injections avec une cire, est montrée.

Prediction of petroleum wax injection in external prestressing cables

ABSTRACT

Prestressing cables may be protected against corrosion by injecting flexible products into the prestressing ducts; such products would include greases, petroleum waxes and epoxy resins. With increases in cable length, excessive duct deformations under the effect of injection pressures that surpass allowable pressures have recently been observed. The ambiguity present, from a regulatory standpoint, in the choice of duct geometry as a function of the nominal cross-section of reinforcements composing the protected unit will be discussed first. The thermomechanical problem created by the injection of petroleum wax will then be elaborated, along with the modeling work conducted and corresponding validation procedure, as part of an experimental program. Lastly, the case of a conventional three-span prestressed concrete bridge will be treated using the computational tool developed herein. The incompatibility of certain combinations of number of cable strands - duct diameter, despite their acceptance according to regulation, will be shown to cause potential problems due to the use of wax injection.

* AUTEUR À CONTACTER

Nicolas ROUSSEL

nicolas.roussel@lpcpc.fr

INTRODUCTION

La protection des câbles de précontrainte contre la corrosion peut être assurée soit par des coulis de ciment, soit par des produits souples comme les graisses, les cires pétrolières ou les résines époxydes. Actuellement, les coulis de ciment restent le moyen de protection le plus utilisé malgré les problèmes parfois générés par leur utilisation (ressuage, mauvais remplissage en point haut

de tracé [1]...). L'injection de produits souples homogènes constitue une solution alternative qui permet de résoudre les problèmes inhérents à la nature hétérogène des coulis de ciment.

Les produits souples utilisés pour les aciers de précontrainte, tout comme les gaines de polyéthylène à haute densité (PEHD) dans lesquelles ils sont injectés, sont des produits organiques sensibles aux variations de température. Les trois cires pétrolières d'injection qui existent sur le marché sont fabriquées et commercialisées par la société CIVETEA sous l'appellation Injectelf®. Il s'agit d'une gamme de produits destinés à la protection des câbles de précontrainte des tabliers d'ouvrages d'art, des câbles des haubans et des tirants d'ancrage. Des produits de la même famille sont également utilisés dans les domaines du transport de l'énergie et de la téléphonie.

Ces produits sont mis en œuvre dans une plage de température située au-dessus de leur point de fusion, dans laquelle leur comportement est celui d'un fluide de faible viscosité, ce qui doit permettre en pratique une injection rapide sous pression, la faible viscosité du matériau limitant les pressions à des valeurs admissibles vis-à-vis de la gaine en PEHD.

Cependant, avec l'augmentation de la longueur des câbles, des problèmes lors de la phase d'injection ont été constatés en 2004. Ils se manifestent sous la forme de déformations excessives de la gaine en PEHD sous l'effet de pressions d'injection dépassant les pressions admissibles, 6 bars (1 bar = 0,1 MPa) étant une valeur couramment retenue. Ces incidents ont lieu majoritairement lors de l'injection de gaines de grande longueur dont le taux d'encombrement (section d'acier/section de la gaine) est trop important.

Trois aspects seront traités :

- l'ambiguïté qui existe d'un point de vue réglementaire sur le choix de la géométrie de la gaine en PEHD en fonction de la section nominale des armatures constituant l'unité à protéger ;
- le problème thermomécanique constitué par l'injection d'une cire pétrolière, la modélisation qui en a été effectuée et sa validation dans le cadre d'un chantier expérimental réalisé en juin 2005 au Laboratoire régional des ponts et chaussées de l'ouest parisien, en partenariat avec TOTAL, EIFFAGE TP et la société d'injection ARTEON ;
- le cas d'un pont courant en béton précontraint à trois travées, pour lequel sera montrée l'incompatibilité de certaines combinaisons nombre de torons/diamètre de gaine, acceptées par la réglementation mais sources potentielles de problèmes d'injection avec une cire [2].

AMBIGUITÉ DES DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

La mise en œuvre des produits souples de protection est soumise à un certain nombre de prescriptions et de spécifications définies dans le fascicule 65A et son additif, « Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint ». Une ambiguïté apparaît à la lecture de ces deux documents sur le choix de la géométrie de la gaine permettant d'assurer un remplissage correct par le produit d'injection.

Extrait du fascicule 65A (Chapitre 92.2.2 Nature, dimensions et courbures)

*La nature, l'épaisseur, le diamètre et les rayons de courbure sont choisis pour [...] assurer un remplissage correct par le produit d'injection. Pour que cette dernière condition soit remplie, le diamètre minimal **intérieur** du conduit ϕ_i est au moins égal à $1,8 \sqrt{A_p}$, A_p étant la section nominale de l'ensemble des armatures constituant l'unité.*

Extrait de l'additif au fascicule 65A (Chapitre Précontrainte extérieure - 72.1.1 Matériaux et type de tubes)

*Le diamètre **intérieur** du conduit ϕ_i doit être au moins égal à $1,7 \sqrt{A_p}$, A_p représentant la section nominale de l'ensemble des armatures constituant l'unité.*

En pratique, pour les unités et les conduits les plus couramment employés, les diamètres extérieurs minimaux utilisables sont donnés dans le tableau ci-après :

Unités	Tubes en polyéthylène (diamètre en mm)
19 T 15	110
27 T 15	125
37 T 15	140

On montrera que la frontière entre une mise en œuvre réussie et l'apparition d'incidents semble se situer entre les valeurs de 1,7 et 1,8 proposées par ces documents.

NATURE ET CARACTÉRISATION DU PRODUIT

Les cires pétrolières sont des produits issus de la distillation du pétrole. Elles sont composées essentiellement d'alcanes linéaires (n-paraffines) ou ramifiées (iso-paraffines) de formule chimique C_nH_{2n+2} . Ce sont des produits chimiquement inertes utilisés pour divers usages (bougies, gommes, etc.). Le terme de cire microcristalline parfois rencontré fait référence à la présence de domaines cristallins de l'ordre du micron, domaines dans lesquels les chaînes d'hydrocarbures se trouvent sous une forme organisée en raison de l'existence d'interactions intermoléculaires de type hydrogène ou Van Der Waals. Les cires contenant environ 10 % de paraffines linéaires et 90 % d'iso-paraffines sont riches en microcristaux et correspondent à des produits souples et adhésifs, alors que les cires riches en n-paraffines sont des produits brillants et fragiles. Ces deux types de cires sont thermofusibles. Généralement, on distingue les paraffines dont les points de fusion sont inférieurs à 70 °C et les cires dont les points de fusion sont supérieurs à 70 °C. L'hydrogénéation des cires a pour but d'éliminer les doubles liaisons susceptibles de donner lieu à des réactions chimiques. La couleur jaune d'origine des cires et des paraffines s'atténue avec son degré de purification (élimination des composés aromatiques résiduels) et d'hydrogénéation pour devenir blanche. Les essais couramment utilisés pour la caractérisation des cires sont indiqués dans le **tableau 1**, avec les caractéristiques de la cire d'injection Injectelf® CP étudiée ici. Les cires Injectelf® correspondent à une gamme de produits pour câble. Elles se distinguent par leur point de fusion. La cire Injectelf® CP est la plus utilisée et présente le point de fusion le plus bas de la gamme.

Un spectre infrarouge (IRTF) de la cire Injectelf® CP a été réalisé afin de déterminer les fonctions chimiques présentes et éventuellement de détecter la présence de certains additifs. Ce spectre, dont

tableau 1
Caractéristiques physico-chimiques de la cire Injectelf® CP - ppm : partie par million.

Caractéristique	Méthode de détermination	Fiche de caractéristiques	Certificat de qualité
		Valeur (ou autre)	
Aspect	Visuelle	Pâteux filant	Pâteux filant
Couleur	Visuelle	Marron	/
Masse volumique	Picnomètre	880 kg/m ³	/
Point de fusion	NF T 60-221	70/75 °C	76,4 °C
Pénétrabilité à l'aiguille	NF T 60-119	140 (1/10 mm)	71 (1/10 mm)
Indice d'acide	NF T 60-133	/	0,14 mg KOH/g
Chlorures	Chromatographie	10/13 ppm	/
Nitrates	Chromatographie	2 ppm	/
Sulfates	Chromatographie	40 ppm	/
Nitrites	Chromatographie	< 0,25 ppm	/

les bandes d'absorption caractéristiques sont indiquées dans le **tableau 2**, révèle la présence de longues chaînes d'hydrocarbures saturées ; on peut également distinguer des composés aromatiques et des esters qui correspondent à des additifs.

tableau 2

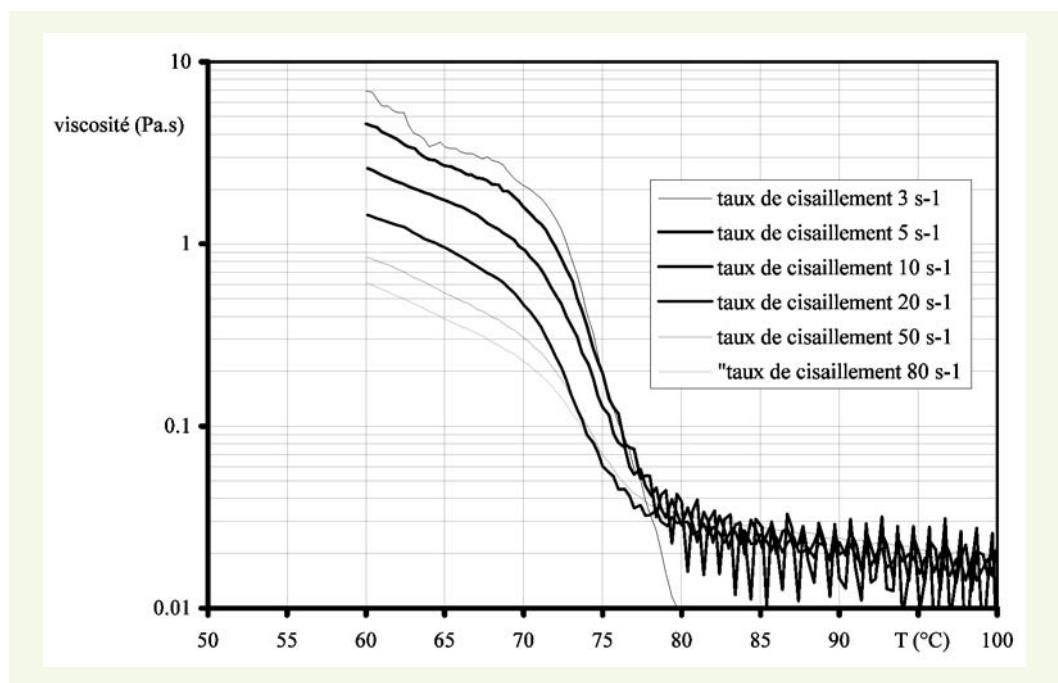
Bandes caractéristiques de la cire Injectelf® CP obtenues par IRIF

Nombre d'onde (cm^{-1})	Fonctions chimiques
2950 à 2840	νCH_3 et νCH_2
1738	$\text{C}=\text{O}$ ester
1602	ν cycle aromatique
1472	δCH_2
1377	δCH_3
725	$(\text{CH}_2)_{n>4}$

Une étude rhéologique du produit en fonction de la température a été réalisée. Les résultats des mesures de viscosité en fonction de la température à différents taux de cisaillement (de 3 à 80 s^{-1}) sont représentés sur la **figure 1**. Au-dessus de la température de cristallisation, la viscosité ne dépend pas du taux de cisaillement. Le comportement du matériau est donc de type visqueux newtonien. La valeur de cette viscosité est de l'ordre de 0,02 Pa.s, c'est-à-dire environ 20 fois celle de l'eau à 20 °C. Il s'agit donc d'un matériau particulièrement fluide. Pour des températures inférieures à 78 °C, la viscosité augmente fortement. Elle est multipliée par 100 sur une vingtaine de degrés. La valeur seuil où la pente de variation de la viscosité en fonction de la température augmente brutalement est d'environ 78 °C, quel que soit le taux de cisaillement, ce qui correspond à la valeur typique du point de fusion conventionnel du produit. En dessous de 78 °C, la viscosité est fonction du taux de cisaillement en raison de la présence de deux phénomènes antagonistes agissant sur la cinétique de cristallisation : la baisse de la température, qui augmente la viscosité en raison de la cristallisation du produit (qui commence en dessous de 90 °C), et le cisaillement, qui déstructure le réseau cristallin et réduit la viscosité. Plus le taux de cisaillement est bas, plus la viscosité augmente rapidement avec la baisse de la température. Ce point traduit le comportement rhéofluidifiant de la cire aux températures inférieures au point de fusion conventionnel.

figure 1

Viscosité de la cire Injectelf® CP en fonction de la température pour différents taux de cisaillement.



MODÉLISATION DE L'INJECTION

La modélisation de l'injection d'une cire pétrolière préchauffée dans une gaine en PEHD contenant des torons à température ambiante est un problème particulièrement complexe. Les phénomènes physiques suivants ont été pris en compte dans le cadre de la modélisation et du développement de l'outil de calcul :

- La cire pétrolière est considérée comme un produit thermo-dépendant rhéofluidifiant en dessous de sa température de cristallisation. Sa viscosité apparente est une fonction décroissante de la vitesse de déformation et de la température.
- Au-dessus de sa température de cristallisation, la cire est considérée comme un fluide visqueux newtonien dont la viscosité est de l'ordre de 20 fois celle de l'eau.
- Lorsqu'elle se refroidit, la cire cristallise ([voir figure 2](#)) et cette cristallisation est exothermique. Ainsi, en dessous de sa température de cristallisation, la cire voit sa vitesse naturelle de refroidissement diminuer.
- Pendant l'écoulement, il existe un transfert de chaleur de la cire vers le milieu extérieur (gaines + acier) considéré comme étant à température constante pendant la durée de l'injection.
- La présence des torons au sein de la gaine est modélisée par un cylindre excentré dont la surface est égale à la surface d'encombrement des torons. La prise en compte de cette géométrie spécifique sur la pression d'injection a fait l'objet d'une étude particulière à l'aide du code de calcul en mécanique des fluides FLOW3D®. FLOW3D® est un code de calcul dédié à la mécanique des fluides développé par la société FlowScience (Nouveau Mexique, USA). Il est particulièrement adapté au traitement de problèmes d'écoulement à surface libre de fluides non newtoniens. Des résultats obtenus avec ce code de calcul sont présentés sur la [figure 3](#).

Les prédictions obtenues par l'outil de calcul développé ont ensuite été comparées à des résultats obtenus sur un chantier expérimental sur lequel 5 gaines de 36 m ont été injectées ([figure 4](#)). La

figure 2

Cire pétrolière en cours de refroidissement ; des zones fluides coexistent avec des zones cristallisées.



figure 3

Configurations géométriques étudiées et champs de vitesses calculés. Vitesses croissantes du noir vers le blanc.

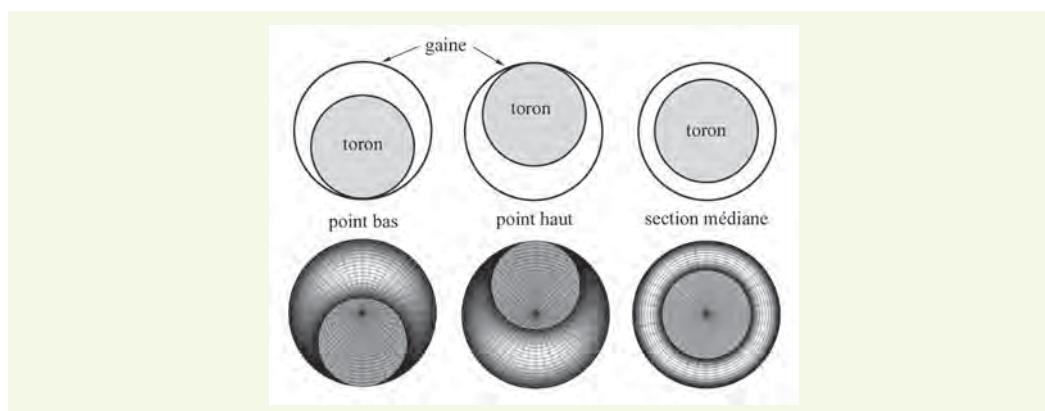


figure 4

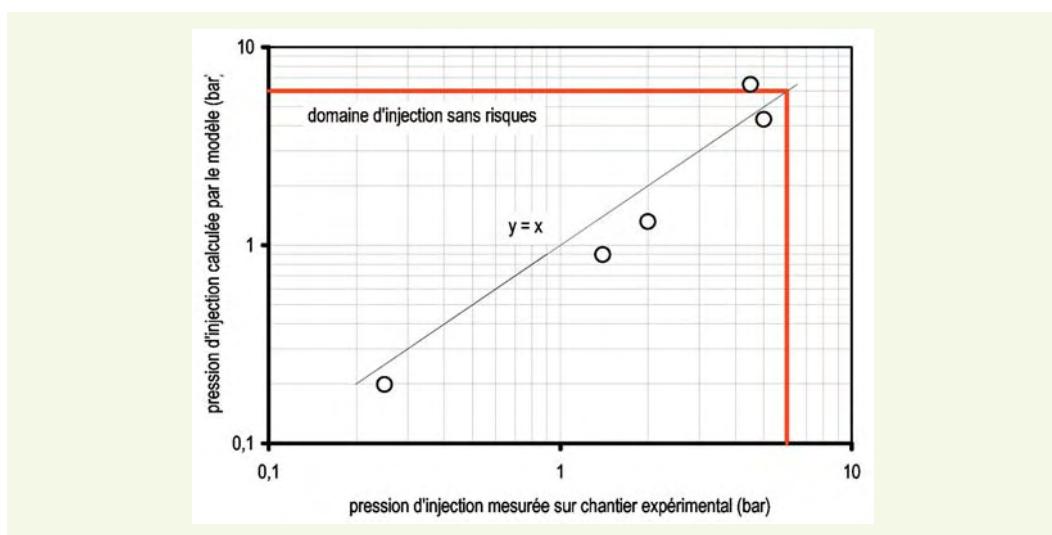
Chantier expérimental d'injection de gaines de précontrainte.



température d'entrée (variable suivant les essais) et la température de sortie de la cire pétrolière ainsi que la pression nécessaire à l'injection ont été mesurées dans les différentes configurations. Le nombre de torons variait de 19 T 15 à 37 T 15 et le diamètre extérieur des gaines de 110 mm à 140 mm. Les résultats obtenus sont représentés sur la **figure 5**.

figure 5

Comparaison des prédictions de l'outil de calcul et des mesures sur chantier expérimental. La droite est d'équation $y = x$ alors que les droites rouges délimitent le domaine d'injection sans risques de déformation excessive des gaines.



Le modèle s'est avéré capable de détecter les situations à risques en prédisant des pressions d'injection certes parfois supérieures à la réalité mais uniquement dans les cas où l'injection en longueur réelle aurait posé de sérieux problèmes.

ÉTUDE D'UN PONT CLASSIQUE

On étudie un pont type à 3 travées en béton précontraint (**figure 6**).

Les câbles de précontrainte extérieure représentés en traits fins sur la **figure 6** sont ancrés sur culée et sur la deuxième pile intermédiaire. Ils rencontrent deux déviateurs en travée de rive, un voussoir sur pile puis deux déviateurs en travée centrale et enfin le deuxième voussoir sur pile sur lequel ils s'ancrent.

À l'aide de l'outil de calcul développé, 4 configurations avec des câbles de longueur 80, 110, 140 et 160 m suivant les portées des travées centrale et de rive ont été étudiées. Ces configurations se déclinent chacune en 3 configurations d'unités de précontrainte composées de 19, 27 et 37 T 15 respectivement placées dans des gaines PEHD de 110, 125 et 140 mm comme suggéré par l'additif du fascicule 65A.

figure 6

Schéma du pont type à 3 travées en béton précontraint. La longueur des gaines à injecter peut varier entre 80 m et 160 m suivant les portées des travées centrales et de rive.



Les simulations ont été réalisées pour une température extérieure de 10 °C, une température d'injection standard de 105 °C et un débit courant de 150 L/min. Pour chaque configuration, le ratio du fascicule 65A $\phi_i / \sqrt{A_p}$ a été calculé. Au vu des résultats présentés dans le **tableau 3**, il apparaît que, sans étude spécifique, seule la valeur de 1,8 du fascicule 65A et non la valeur de 1,7 de l'additif permet vraiment de se mettre en sécurité vis-à-vis des problèmes pouvant survenir pendant l'injection.

N° configuration	Longueur (m)	Torons	Gaine	Section nominale (mm²)	Pression nécessaire (bar)	Mise en œuvre	Ratio comme défini par le fascicule 65A
1	80	19T15	110	2 850	2,9	aisée	1,82
2	100	-	-	-	3,7	aisée	-
3	140	-	-	-	4,6	aisée	-
4	160	-	-	-	5,2	aisée	-
5	80	27T15	125	3 780	3,8	aisée	1,73
6	100	-	-	-	5,1	aisée	-
7	140	-	-	-	6,3	risquée	-
8	160	-	-	-	7,2	risquée	-
9	80	37T15	140	5 550	5,6	aisée	1,70
10	100	-	-	-	7,5	risquée	-
11	140	-	-	-	9,4	incident	-
12	160	-	-	-	10,6	incident	-

tableau 3

Pression nécessaire à une injection complète de la gaine dans différentes configurations. Les calculs ont été réalisés pour une température de cire de 105 °C, une température extérieure de 10 °C et un débit d'injection de 150 L/min.

Il est à noter également qu'une baisse de la température jusqu'à la valeur limite de 5 °C peut faire basculer certaines de ces configurations dans des plages de pression d'injection dangereuses. Par exemple, dans le cas de la configuration n° 4, une injection de cire à 100° avec une température extérieure de 5 °C ferait monter la pression d'injection à plus de 7 bars, la température de la cire à la sortie de la gaine descendant alors jusqu'à 65 °C.

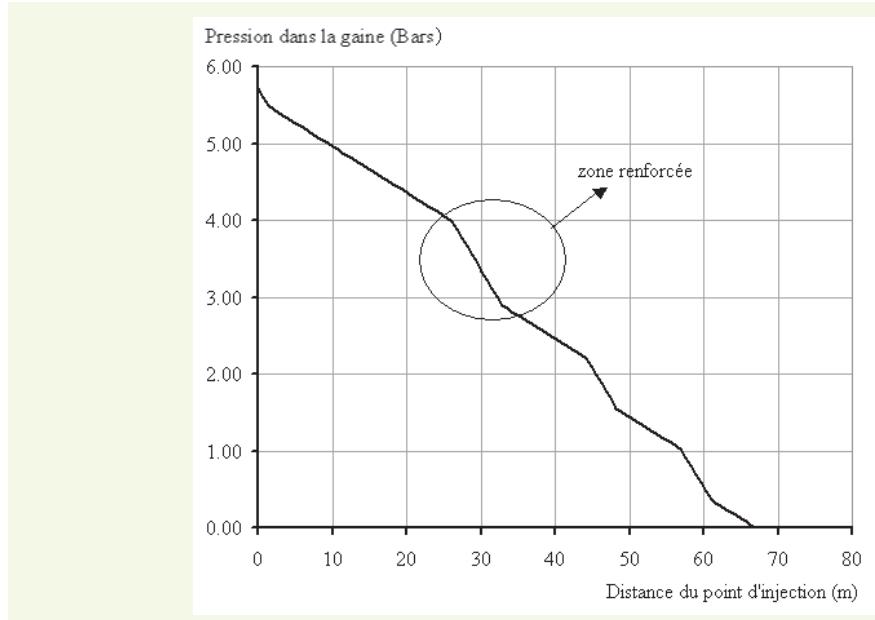
De la même manière, une diminution du débit de façon à réduire la pression d'injection a pour conséquence secondaire d'augmenter le temps passé par la cire dans la gaine pendant l'injection et donc de lui faire atteindre des températures trop basses.

De plus, il est aussi à noter que l'on voit apparaître sur certains ouvrages des configurations que l'on pourrait qualifier de « renforcées » dans lesquelles l'épaisseur de la gaine est augmentée sur les déviateurs. Les gaines PE100-PN10 (épaisseurs de 6,3 mm, 7,4 mm et 8 mm) de l'exemple traité ici pourraient, dans cette optique, être remplacées par des gaines PE80-PN10 (épaisseurs de 8,1 mm, 9,2 mm et 10,3 mm). L'épaisseur des gaines augmente mais, leurs diamètres extérieurs restant les mêmes pour des raisons d'encombrement, l'espace libre entre gaine et torons diminue et la pression nécessaire à l'injection augmente. L'outil de calcul développé est à même d'étudier ces configurations plus complexes dans lesquelles le gradient de pression augmente au passage de ces sections restreintes. Un exemple de profil de pression d'injection calculée dans un tel cas (viaduc de Meaux) est présenté sur la **figure 7**.

Enfin, la pratique actuelle, face à ces difficultés, s'oriente le plus souvent vers une injection de la gaine par son milieu, ce qui réduit les longueurs à injecter. Cette solution est plus facilement réalisable si elle est prise en compte dès la phase de conception de l'ouvrage.

figure 7

Pression dans la gaine lors de l'injection (viaduc de Meaux 2005). L'influence de la gaine renforcée sur déviateur est mise en évidence.



CONCLUSIONS

Du point de vue de la conception, une valeur du ratio d'encombrement ϕ_i / A_p supérieure à 1,8 semble permettre de se prémunir contre les risques de surpression pendant l'injection de la cire. Si, pour des raisons d'encombrement, une valeur comprise entre 1,7 et 1,8 est retenue, il semble alors nécessaire de vérifier préalablement les conditions d'injection. L'outil de calcul développé et validé au LCPC peut dans ce cas apporter une aide précieuse.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Monsieur Éric Thibœuf de la société SPIE pour les informations fournies et l'aide apportée sur le chantier du viaduc de Meaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 ROUANET D., LE ROY R., ROUSSEL N., STÉFANI C., Vers une meilleure maîtrise de l'injection des gaines de précontrainte, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **250-251**, 2004, pp. 65-73.
- 2 ROUSSEL N., Protection des câbles de précontrainte extérieure par injection de cires pétrolières : modélisation de l'injection et conséquences pratiques, *Bulletin ouvrages d'art du CTOA du Sétra*, **51**, 2006, pp. 8-11.