

Identification des paramètres favorisant la formation de poches d'air et d'eau dans les coulis de ciment pour gaines de précontrainte

RÉSUMÉ

Le but de cette étude est d'identifier les paramètres favorisant la remontée de vides et d'eau aux points hauts des gaines de précontrainte. Pour ce faire, deux campagnes d'essais d'injection ont été réalisées par les Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC) de l'Ouest Parisien et d'Angers. Dans ce cadre, l'essai d'injection du tube de 5 m, tel qu'il est préconisé par le règlement d'avis technique sur les coulis, a été analysé ainsi que différentes méthodes. Ces campagnes ont également impliqué la recherche d'un essai de laboratoire susceptible de remplacer celui proposé actuellement par le fascicule 65 A pour la mesure du ressuage. L'étude de l'injection de gaines en vraie grandeur a permis d'observer l'avancée du front de coulis et de montrer que l'ordre de purge des points hauts dépend de la géométrie de la gaine. L'efficacité des réservoirs aux points hauts et du repoussage après injection a été jugée bénéfique pour des coulis non thixotropes. Les essais sur gaines de 5 m ont clairement montré les rôles importants que jouent l'inclinaison des gaines et la présence des torons dans l'amplification des volumes d'air et d'eau apparaissant en partie haute. On conclut ainsi que l'essai proposé dans le règlement de l'avis technique sur les coulis de ciment pour la précontrainte est tout à fait approprié. Enfin, un essai sur tube de 1 m a été proposé. Cet essai, qui prend en compte les facteurs amplificateurs de l'exsudation et de l'apparition de vides aux points hauts, est à préconiser pour la mise au point de formules en laboratoire. Il pourrait remplacer de manière judicieuse l'essai d'exsudation du Fascicule 65 A et de la norme NF P 18 359.

MOTS CLÉS : *Coulis - Injection (matér.) - Précontrainte - Essai - Laboratoire - Vide - Eau - Recommandation - Norme - Ciment - Tube (conduite).*

Robert LE ROY

Docteur de l'École nationale des Ponts et Chaussées
Chef de la section Formulation et mise en œuvre du béton
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Michel WILLAERT

Chef du groupe Matériaux, ouvrages d'art
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Ouest Parisien

Denis ROUANET

ITPE
Chef de l'unité Construction et entretien d'ouvrages
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

Hervé MIRMAND

Technicien supérieur
Responsable d'essais au groupe Matériaux, ouvrages d'art
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Ouest Parisien

Introduction

Les observations faites sur les ouvrages d'art montrent que la corrosion des câbles de post-tension se déclenche aux endroits où le coulis fait défaut. Pour les coulis de ciment, l'absence de coulis provient d'un manque de stabilité (*sédimentation*) du coulis ou d'imperfections dans l'opération d'injection.

Sédimentation et ressuage

Sous l'action de la gravité, les grains du coulis de ciment ont tendance à chuter avec une vitesse fonction de la taille des grains. La présence de pâte blanche, composée essentiellement d'ettringite et de portlandite, en partie haute de l'éprouvette, témoigne de la ségrégation de la suspension. Celle-ci est possible lorsque les grains ne sont pas liés les uns aux autres, ce qui est le cas lorsqu'un superplastifiant est utilisé à saturation. On pense que les cristaux d'ettringite et de portlandite sont suffisamment fins pour être entraînés par effet hydrodynamique par l'eau qui remonte. Ce phénomène est contrecarré en partie lorsque se créent des liaisons entre particules. Dans ce cas, le coulis peut subir un tassement d'ensemble, laissant apparaître une couche d'eau claire en partie supérieure, appelée couche de ressuage ou exsudat. Ces deux mécanismes élémentaires peuvent être à l'origine de la corrosion des câbles parce qu'ils engendrent l'apparition de poches d'eau en partie haute des gaines de précontrainte.

Pour que les câbles de précontrainte soient protégés, il faut donc réaliser le remplissage complet des gaines avec un produit stable qui empêche la corrosion. Quand il s'agit de coulis de ciment, cela revient à respecter trois conditions :

❶ **le remplissage des conduits** doit être effectué sans emprisonner de bulles d'air. Ce risque apparaît particulièrement lorsque le front de coulis franchit le sommet d'une courbe (point haut). Dans la plupart des cas, un évent judicieusement placé permet de purger la zone de la poche d'air qui s'y est formée, mais ce n'est pas toujours possible, particulièrement pour les ponts à précontrainte extérieure, pour lesquels le voussoir de pile dispose d'un déviateur en béton ne permettant pas la présence d'un évent au point haut ;

❷ **le coulis** doit rester homogène avant la prise. L'objectif est l'absence de ressuage, ce qui suppose une limitation de la sédimentation et l'immobilisation des bulles d'air qui se sont formées lors du malaxage et de l'injection (moins de 1 % du volume total, en général) ;

❸ **le coulis** doit être chimiquement stable et protecteur, pour empêcher toute corrosion des câbles pendant la durée de service de l'ouvrage.

Le respect de ces contraintes est favorisé par la mise en place de recommandations spéciales sur les matériaux et les méthodes. Ainsi, une procédure d'avis technique a été instaurée en France pour les matériels de fabrication, les matériels d'injection et les formules de coulis (Fascicule 99-11, 1999 ; Chaussin et al., 1998). Les recherches sur les coulis de précontrainte portent quant à elles essentiellement sur le contrôle de la mise en œuvre (Concrete Society, 1999 ; Raiss, 1995), les techniques d'injection (Luther et al., 1996 ; Tilly et Woodward, 1996 ; Rostasy et Gutsch, 1996), l'amélioration de la stabilité des coulis (Dugat et al., 1996 ; Bastien et al., 1997 ; Diederichs et Shutt, 1989 ; Ranisch et Rostasy, 1989) et l'efficacité d'agents protecteurs (Schokker et al., 1998).

Le LCPC participe depuis longtemps à cet effort de recherche et de recommandations, notamment sur les problèmes de stabilité, et il proposait déjà dans les années 1980 des formules de coulis dites « formules régionales ». Des méthodes de formulation des coulis de ciment ont été plus récemment proposées (Le Roy et al., 1998).

Parallèlement, les techniques d'injection ont été développées par les différentes entreprises distributrices des procédés de précontrainte, parfois conjointement avec les maîtres d'œuvre, tels que EDF. On peut citer, par exemple, les techniques consistant à créer une dépression en amont du coulis ou à repousser celui-ci, un certain temps après l'injection. Celle développée spécifiquement par EDF pour les enceintes de confinement consiste à fractionner l'injection en plusieurs phases et à placer, en différents points de la gaine, des réservoirs de coulis qui assurent un niveau constant dans celle-ci.

Bien que des progrès récents aient été constatés dans le domaine de la stabilité des coulis, grâce essentielle-

ment à la présence d'agents stabilisants*, des lacunes subsistent dans la maîtrise des injections. Des contrôles effectués sur ponts précontraints à poutres ou à caissons ont montré l'existence de vides dans de nombreuses gaines (Godart et al., 1999). Des investigations supplémentaires sur la formulation et les procédés de mise en œuvre sont donc encore nécessaires, notamment pour les conditions extrêmes, tels que les câbles verticaux ou inclinés de grande longueur.

Dans le thème de recherche du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées consacré aux adjuvants et animé par P. Witier (1995-1998), un des sujets a porté sur les coulis d'injection pour la post-tension. Il était scindé en trois axes :

❶ étude de la sédimentation des coulis et des moyens d'annuler le ressuage (Le Roy et al., 1998 ; Xa Khien, 1997). Dans cette partie, on a étudié l'effet des adjuvants, et notamment les effets néfastes de dosages supérieurs à la saturation, l'intérêt de rechercher à optimiser la partie solide, etc. L'étude est poursuivie puisqu'elle fait l'objet d'une thèse cofinancée par l'Association technique de l'industrie des liants hydrauliques (ATILH) dans la division des « bétons et composites cimentaires » du LCPC (Gelade, en cours) ;

❷ étude de l'essai au tube incliné de 5 m, tel qu'il est proposé dans la procédure d'avis technique, et recherche d'une alternative moins lourde à cet essai ;

❸ examen des techniques de remplissage sur des gaines translucides de 20 mètres.

Les deux dernières questions (procédure d'injection, contrôle du coulis *in situ*) ont été étudiées à l'occasion de deux campagnes d'essais réalisées par les LRPC d'Angers et de l'Ouest Parisien, avec l'appui de la société GTM pour la première, et du syndicat des entreprises distributrices des procédés de précontrainte (SEDIP) pour la seconde.

Le présent article est une synthèse des résultats de ces deux campagnes d'essais.

Programme expérimental

Les programmes expérimentaux réalisés en 1997 et 1998 ont porté, en premier lieu, sur la validation de l'essai de stabilité au tube incliné. Cet essai, qui consiste à caractériser en vraie grandeur la stabilité d'un coulis, en mesurant l'exsudation et le volume d'air au sommet du tube (LCPC-SETRA, 1996 ; Fascicule spécial 99-11, 1999 ; Chaussin et al., 1998) est intéressant car il tient compte de l'effet « de filtre » dû à la

* Appelés aussi « agents de viscosité », bien qu'ils agissent surtout sur le seuil d'écoulement et son évolution dans le temps. Ils sont de la famille des polysaccharides, des méthylcelluloses, des ultrafines telles que la fumée de silice, la silice de précipitation, etc.

présence des torons* et de l'effet Boycott** (Boycott, 1920 ; Acrivos et Herbolzheimer, 1979 ; Jufroy, 1994) dû à l'inclinaison du tube. Il permet de qualifier la formulation du coulis, la méthode de fabrication et la méthode d'injection. La validation de l'essai au tube de 5 m a consisté à évaluer, d'une part, la reproductibilité de l'essai et, d'autre part, l'influence sur l'exsudation de variations des paramètres liés à l'essai, tels que le nombre de torons, leur forme, l'inclinaison du tube, la matière du tube, la procédure d'injection, un changement de dosage en eau du coulis. Cette première partie du programme a été réalisée du 8 au 11 décembre 1997, dans les deux laboratoires, avec un même lot de matériaux et les mêmes matériels. La répétabilité a, quant à elle, été étudiée sur six tubes injectés dans des conditions identiques, à partir de trois gâchées successives, le 2 décembre 1998 au LRPC d'Angers.

Parallèlement, dans le cadre de la mise au point d'un nouvel essai intégrant les principales causes d'exsudation, des expériences sur tubes de 1 m, remplis par gravité, ont été réalisées. Ces essais pourraient éventuellement se substituer aux essais sur éprouvettes de 100 ml, reconnus peu discriminants.

Enfin, des essais sur gaines souples de 20 m ont été effectués. Elles reproduisent le tracé « sinusoïdal » de la précontrainte d'un pont-dalle à deux travées. Les objectifs sont de visualiser la progression du coulis dans

* On l'appelle ainsi conformément à l'idée selon laquelle l'eau du coulis, sous l'effet des gradients de pression, remonte par les interstices entre les fils des torons. Des effets spectaculaires de « petites fontaines » ont ainsi été observées sur les câbles verticaux de grande hauteur. Cette eau ou suspension diluée repousse l'air, qui se retrouve alors en partie supérieure.

** Boycott était un médecin qui constata par hasard que la sédimentation du sang est plus rapide lorsque le tube d'essai est incliné.

une gaine transparente à échelle réelle, d'étudier l'efficacité des purges, puis du repoussage et enfin d'essayer un système de réservoir qui, placé au point haut, serait susceptible de récupérer les produits délétères.

Programme expérimental sur tube de 5 mètres

Le dispositif expérimental est composé d'un tube transparent en PVC de 5 m de longueur, incliné à 30 degrés pour l'essai standard, et équipé d'embouts permettant l'injection au point bas et la purge au point haut (fig. 1a et 1b). Dans l'essai courant, le tube contient douze torons T15.

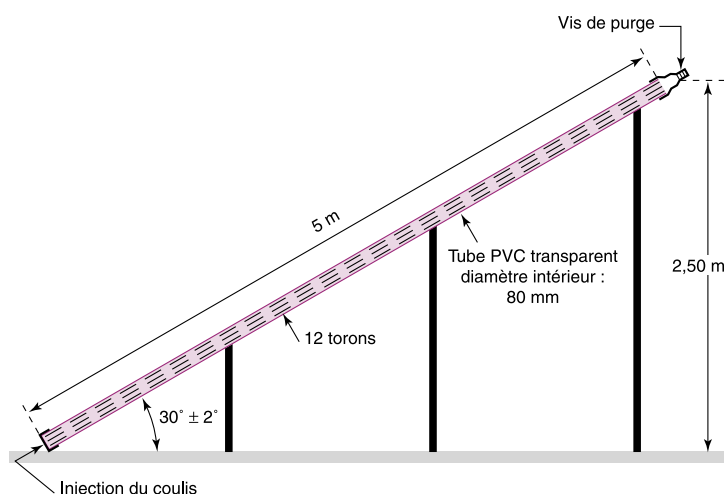
Grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées correspondent aux **volumes** des produits d'exsudation présents en partie supérieure à des échéances comprises entre 0 et 24 heures après la fin ou la reprise d'injection :

- air ;
- liquide ;
- substance, autre que le coulis sain, ayant la consistance d'une pâte ou d'un gel ;
- total de tous les produits précédents.

Paramètres étudiés

Un certain nombre de paramètres ont été étudiés (tableau I) dans le but de vérifier que l'essai est correctement conçu, c'est-à-dire qu'il prend en compte convenablement les facteurs qui amplifient les phénomènes de ressuage (eau claire) et de ségrégation (pâte blanche) par rapport à un essai réalisé avec une simple éprouvette de laboratoire (cf. tableau IV). Ainsi, l'effet des torons sur la stabilité du coulis a été étudié en faisant varier leur nombre (0, 6 et 12 torons) ou leur



a. Schéma.



b. Vue générale.

Fig. 1 - Tube de 5 mètres.

TABLEAU I
Numérotation et paramètres des essais sur tube de 5 mètres

N° essai	Longueur tube (m)	Nombre de torons	Gaine	Inclinaison (degrés)	Coulis	Repoussage à 1 h
T5-97-1 ; A5-97-1	5	12	PVC	30	C1	
T5-97-2 ; A5-97-2	5	6	PVC	30	C1	
T5-97-3 ; A5-97-3	5	0	PVC	30	C1	
T5-97-4 ; A5-97-4	5	12 cirés	PVC	30	C1	
T5-97-5 ;	5	12	PEHD	30	C1	
A5-97-5	5	48 fils lisses	PVC	30	C1	
T5-97-6 ; A5-97-6	5	12	Feuillard	30	C1	
T5-97-7 ; A5-97-7	5	12	PVC	26	C1	
T5-97-8 ; A5-97-8	5	12	PVC	37	C1	
T5-97-9 ; A5-97-9	5	12	PVC	30	C1	X
T5-97-10 ; A5-97-10	5	12	PVC	30	C2	
T5-97-11 ; A5-97-11	5	12	PVC	30	C2	X
A5-98-1 à 6	5	12	PVC	30	C3	

Les essais réalisés par les LRPC d'Angers et de l'Ouest Parisien commencent respectivement par la lettre A et T. Le chiffre qui suit la lettre est la longueur du tube en mètre. Le nombre suivant est l'année au cours de laquelle la campagne d'essais a eu lieu. Le dernier chiffre est le numéro de l'essai.

forme (essai avec quarante-huit fils lisses, douze torons cirés avec gainage extérieur retiré). L'influence de la matière constituant la gaine de précontrainte a été également étudiée (tube PVC, gaine PEHD, feuillard métallique). En effet, on peut imaginer que les annelures de la gaine en feuillard sont susceptibles de ralentir la remontée d'eau par rapport à une gaine lisse. L'effet Boycott (Boycott, 1920 ; Acrivos et Herbolzheimer, 1979 ; Jufroy, 1994) a été étudié en faisant des expériences sur des tubes d'inclinaisons différentes (26, 30 et 37 degrés) par rapport à l'horizontale. La formulation du coulis, particulièrement l'effet du dosage en eau sur le ressuage, a été étudiée afin d'évaluer le degré d'amplification du phénomène par cet essai par rapport à celui observé sur les éprouvettes de 100 ml du Fascicule 65 A (1992). Enfin, l'efficacité de la technique consistant à réinjecter le tube une heure après la première injection pour évacuer les produits délétères éventuellement formés a été vérifiée.

Programme expérimental sur tube de 1 mètre

Le dispositif est composé d'un tube transparent en PVC de 1 m de hauteur, aux extrémités duquel sont collées deux plaques en PVC, celle en partie haute étant percée de deux orifices de 20 mm de diamètre (fig. 2a et 2b). On remplit le tube en plaçant un cône (le cône de Marsh, par exemple) dans un des orifices, le trop plein s'évacuant par le second.

Grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées correspondent aux volumes des produits d'exsudation présents en partie supérieure à des échéances comprises entre 0 et 24 heures après la fin du remplissage :

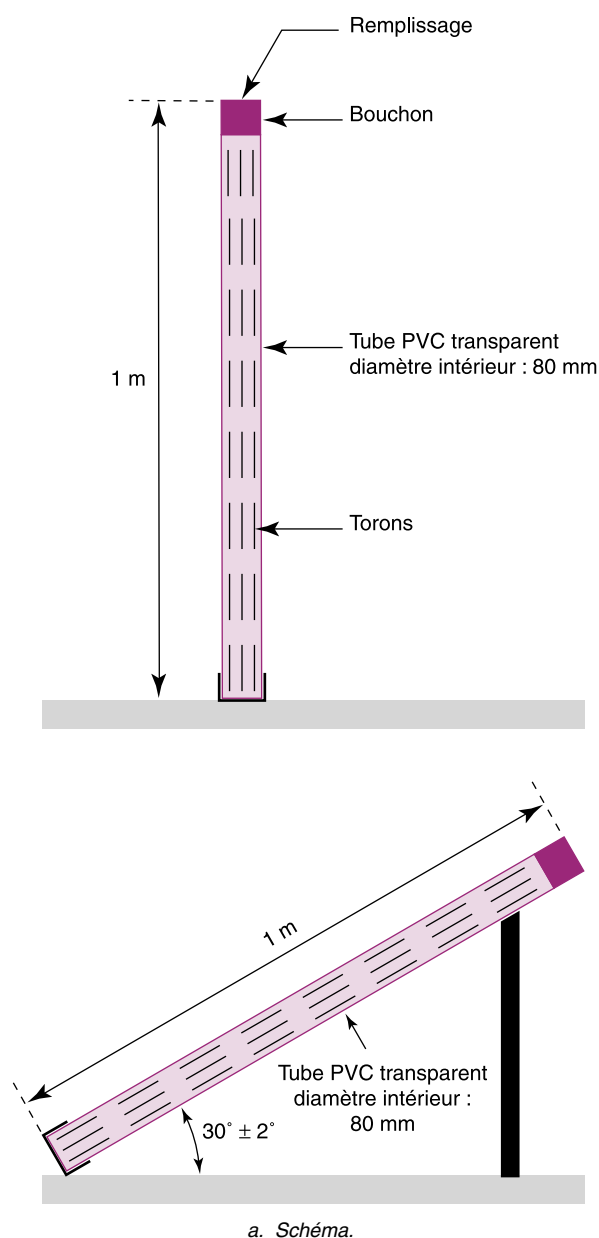
- air (uniquement pour les essais réalisés en 1998) ;
- liquide ;
- substance, autre que le coulis sain, ayant la consistance d'une pâte ou d'un gel ;
- total de tous les produits précédents.

Paramètres étudiés (tableau II)

Les paramètres d'étude sont à rapprocher de ceux de l'essai au tube de 5 m. L'effet du nombre d'armatures

TABLEAU II
Numérotation et paramètres des essais sur tube de 1 mètre

N° essai	Longueur tube (m)	Nombre de torons	Gaine	Inclinaison (degrés)	Coulis
T1-97-1	1	6	PVC	30	C1
T1-97-2	1	0	PVC	30	C1
T1-97-3	1	6	PVC	Vertical	C1
T1-97-4	1	0	PVC	Vertical	C1
T1-97-5	1	6	PVC	30	C2
T1-97-6	1	0	PVC	30	C2
T1-97-7	1	6	PVC	Vertical	C2
T1-97-8	1	0	PVC	Vertical	C2
T1-98-1 à 7	1	12	PVC	30	C3
T1-98-8 à 10	1	12	PVC	Horizontal	C3
T1-98-11 à 13	1	12	PVC	60	C3
T1-98-14 à 16	1	12	PVC	Vertical	C3
T1-98-17 à 20	1	0	PVC	30	C3
T1-98-21 et 22	1	0	PVC	60	C3
T1-98-23 à 25	1	12	PVC	30	C5



b. Vue générale.

Fig. 2 - Tube de 1 mètre.

a été étudié (0, 6 et 12 torons de diamètre 15 mm), l'inclinaison des tubes par rapport à l'horizontale (0, 30, 60 et 90 degrés) et la formulation du coulis (rapport e/c variant de 0,34 à 0,40, plus un coulis à stabilité améliorée). De plus, la répétabilité de l'essai a été évaluée en réalisant sept essais identiques.

Mesure des volumes sur les tubes de 1 et 5 mètres

En 1997, la mesure des volumes sur tube de 5 m a été réalisée de façons différentes aux LRPC d'Angers et de l'Ouest Parisien. Dans le premier cas, 24 heures après l'injection, les tubes sont extraits de leur support puis découpés à environ 1 m au-dessous de la vanne de sortie, de façon à pouvoir manier plus facilement l'extrémité du tube. Pour mesurer le volume du liquide

exsudé, on démonte la vanne, puis on verse le liquide dans une éprouvette graduée. On déduit ensuite le volume des vides par soustraction avec un volume d'eau réintroduit dans le tube. Le phénomène de décanation relevé sur le liquide exsudé permet d'estimer le volume de sédiment. Cette méthode, dite de mesure directe, présente l'inconvénient de sous-estimer le volume de sédiment qui pourrait être resté « emprisonné » dans le tube.

Au LRPC de l'Ouest Parisien, les volumes d'air, de liquide et de sédiment ont été estimés à partir de leur épaisseur et de leur longueur respective le long de la génératrice supérieure du tube. Un calcul théorique est ensuite réalisé pour déduire le volume de chacune des grandeurs (volume d'un tube coupé par un plan). Cette méthode, appliquée aussi sur le tube de 1 m, présente l'inconvénient de simplifier des volumes aux formes

complexes et de faire une estimation concernant la partie cachée de l'embout.

En 1998, c'est la méthode par mesure directe des volumes qui a été appliquée sur les tubes de 5 et 1 mètre.

Programme expérimental sur gaines de 20 mètres

Le dispositif est composé de gaines souples, en PVC translucide, de 60 mm de diamètre intérieur, renforcées de spires métalliques, équipées de quatre torons (fig. 3a et 3b). Fixées sur des bâtis espacés de 2 m, de façon à obtenir un tracé « sinusoïdal », elles ont un dénivelé de 0,80 m aux extrémités et d'un mètre en partie centrale (cf. fig. 3a). Ces gaines sont équipées de trois événements placés respectivement aux deux extrémités et au point haut central. Cette disposition s'approche de celle d'un pont de type passage supérieur ou inférieur à dalle précontrainte (PSIDP) à deux travées, à la différence que la pente au point haut d'un PSDP est de l'ordre de 3 %,

alors que celle du modèle étudié est de 15 %. De plus, compte tenu des difficultés d'enfilage dans les gaines souples, seuls quatre T15 ont pu être introduits. On a donc un rapport de la section d'acier à celle de la gaine de 0,20 au lieu de 0,36 environ dans la pratique courante. En outre, signalons que, d'une part, les gaines n'étaient pas équipées des dispositifs réels d'ancrage (trompette, plaque d'ancrage, clavettes), ce qui modifie la circulation du coulis dans les extrémités et que, d'autre part, les câbles n'étaient pas tendus, ce qui change leur position ainsi que celle des fils constitutifs.

Paramètres étudiés et procédures dans la première campagne (tableau III)

Les quatre gaines ont été injectées avec un coulis standard volontairement surdosé en eau ($e/c = 0,38$) dans le but d'amplifier le phénomène d'exsudation. Les différentes gaines ont été injectées de la façon suivante.

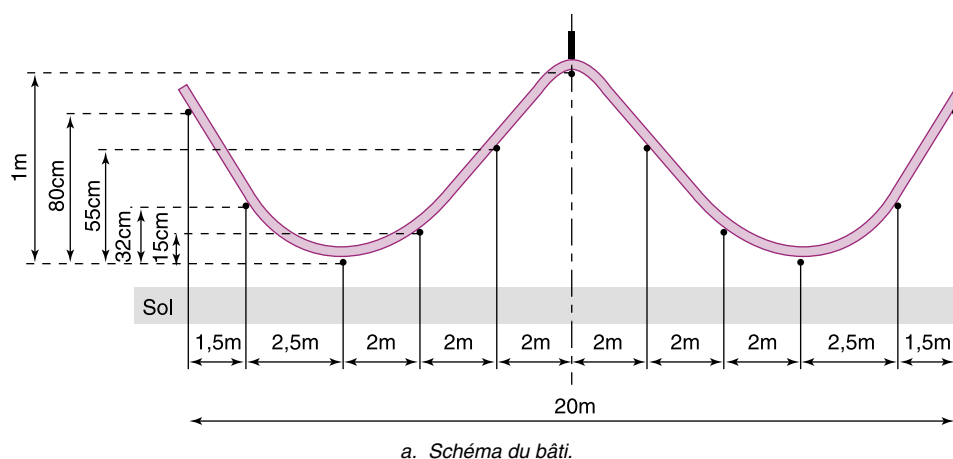


Fig. 3 - Gains de 20 mètres.

TABLEAU III
Numérotation et paramètres des essais sur gaine de 20 mètres

N° de gaine	Nombre de torons	Coulis	Mode de purge*	2 réservoirs à coulis	Repoussage à 1 h
1.1	4 T 15	C2	purge de EC puis de ES	non	non
1.2	4 T 15	C2	purge de EC puis de ES	oui	non
1.3	4 T 15	C2	purge de EC puis de ES	non	côté injection
1.4	4 T 15	C2	purge de EC puis de ES	non	côté sortie
2.1	0	C4	purge de EC puis de ES	non	non
2.2	4 T 15	C4	purge de EC puis de ES	oui	non
2.3	4 T 15	C4	purge de EC puis de ES	non	non
2.4	4 T 15	C4	EC fermé purge de ES	non	non
2.5	4 T 15	C5	purge de EC puis de ES	non	non

* EC,ES : Event central, Event de sortie.

Gaine 1.1

Cette gaine a été injectée de la même manière que celles des PSDP (injection en une seule fois, avec purge à l'évent central puis à l'évent d'extrémité).

Gaine 1.2

Elle a été injectée de la même façon, mais munie de deux réservoirs, l'un situé au point haut central, l'autre à l'extrémité opposée à l'injection (fig. 4).



Fig. 4 - Système de réservoir.

Gaine 1.3

La gaine 1.3 a d'abord été injectée comme la gaine 1.1, puis le coulis a été repoussé au bout d'une heure par le côté de l'injection, en réitérant la même procédure de purge des événements.

Gaine 1.4

La gaine 1.4 a été injectée comme la gaine 1.3, à l'exception du repoussage du coulis, qui s'est fait par le côté opposé à celui de l'injection.

Paramètres étudiés et procédures dans la seconde campagne (tableau III)

Quatre gaines ont été injectées avec un coulis standard dosé normalement en eau ($e/c = 0,35$), et ayant une fluidité de l'ordre de 10 secondes en sortie de malaxeur. La cinquième gaine (gaine 2.5) a été injectée avec un coulis thixotrope ($e/c = 0,36$, fluidité de 15 secondes en sortie de malaxeur). Les différentes gaines ont été injectées comme suit.

Gaine 2.1

La gaine 2.1, sans toron, a été injectée de la même manière que celles des PSDP (injection en une seule fois, avec purge à l'évent central puis à l'évent d'extrémité).

Gaine 2.2

La gaine 2.2, munie de quatre torons T15 et de deux réservoirs (cf. fig. 4), a été injectée comme la gaine 1.2, mais avec un diamètre intérieur de la connexion du réservoir à la gaine augmenté pour faciliter la remontée des produits délétères.

Gaine 2.3

La gaine 2.3, dite de référence, contenant quatre torons T15, a été injectée suivant la procédure de la gaine 2.1.

Gaine 2.4

La gaine 2.4 a été injectée avec l'évent central fermé (cet essai n'a pas pu être complètement exploité car, au moment de la mise à la pression atmosphérique de la gaine, son retour élastique a diminué grandement la bulle d'air enfermée lors de l'injection).

Gaine 2.5

Cette gaine, identique à la gaine 2.3 du point de vue du nombre de torons et de la procédure d'injection, a été injectée d'un coulis thixotrope.

Remarque

La campagne de 1988 a été réalisée dans des conditions de température particulièrement basse (température extérieure voisine de 0 °C). D'après le Fascicule 65 A « Exécution des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint », il est interdit d'injecter quand la température du béton descend en dessous de 0 °C et des précautions doivent être prises pour des températures du béton comprise entre 0 et 5 °C. Ici, évidemment, il n'y a pas de béton autour des gaines donc les prescriptions de température sont applicables au milieu extérieur. Les conditions de température lors de la campagne 1998 sont donc des conditions, certes limites, mais qu'il est possible de rencontrer sur chantiers.

Observations et mesures réalisées

L'avancement du front de coulis dans les gaines a été observé visuellement et enregistré sur un document vidéo pour analyse. L'efficacité du remplissage défini-

tif a été évaluée 24 heures après l'injection. Pour mesurer le volume d'air ou de liquide emprisonné dans la gaine, des tronçons de gaine d'un mètre environ ont été découpés :

- le volume de liquide a été mesuré directement par récupération du liquide dans une éprouvette graduée ;
- le volume d'air a été mesuré par remplissage du volume de vide par un volume d'eau à l'aide d'une éprouvette graduée.

Formulation et caractéristiques des coulis (tableau IV)

Les coulis utilisés lors de la campagne de 1997 sont constitués de ciment CPA CEM I 42,5, d'eau et d'un adjuvant liquide dosés de façon à obtenir deux rapports e/c différents (e/c = 0,34 pour le coulis C1 et 0,38 pour le coulis C2). La campagne de 1998, destinée essentiellement à étudier les problèmes de répétabilité, nous a conduits, pour les tubes de 1 et 5 m, à utiliser le même type de coulis volontairement surdosé en eau (coulis C3). En revanche, l'injection des gaines de 20 m, destinée à vérifier la progression du front de coulis, a été réalisée avec une formule courante de chantier (coulis C4, e/c = 0,35). Enfin, un coulis thixotrope a été essayé sur trois tubes de 1 m et une gaine de 20 m en respectant la formule théorique du fabricant (coulis C5, e/c = 0,36).

Réalisation des essais

Cette partie décrit les matériels utilisés, la méthode de préparation du coulis et le protocole d'injection.

TABLEAU IV
Formulation et caractéristiques des coulis

Constituant	Type/Nature	C1	C2	C3	C4	C5
Ciment (kg)	Ciment CPA CEM I 42,5 PM ES	100	100	100	100	100
Adjuvant (liquide) (kg)	Naphtalène sulfonate (extrait sec = 0,72 % poids ciment)	1,8	1,8	1,8	1,8	2 poches hydrosolubles
Eau (ajoutée) (kg)	Eau du réseau	32,92	36,92	38,92	33,92	36
Rapport E (totale)/C	(L'eau totale tient compte de l'eau contenue dans l'adjuvant liquide)	0,34	0,38	0,40	0,35	0,36
Caractéristiques complémentaires						
Densité à t ₀		2,05	2,02	1,97	/	/
Fluidité à t ₀ (à t ₀ + 1 h) (s) (NF P 18 358)		12,5 (13,0)	10,0	9,0	10 à 14	15
Température du coulis à t ₀ (°C)		18	18	10	10	10
Température ambiante (°C)		≈ 15 °C		≈ 1 °C		
Exsudation à 3 h au tube de 100 ml (%) (NF P 18 359)		0,5	1,5	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Exsudation à 24 h au tube de 100 ml (%) (NF P 18 359)		0	0	0	0	0
Temps de début de prise (de fin de prise) (NF P 18 362)		9 h 30 (11 h 50)	/	/	/	/
Résistance à la flexion à 28 jours (MPa) (NF P 18 360)		12	11	11	14	13
Résistance à la compression à 28 jours (MPa) (NF P 18 360)		94	82	73	82	76

Matériels de malaxage et d'injection

Des matériels de chantier ont été utilisés pour la préparation des coulis et l'injection des gaines de 5 et 20 m. Dans la première campagne, on a utilisé une centrale d'injection de type TC 400 de la société GTM, comprenant deux malaxeurs à haute turbulence d'une capacité de 160 l et une cuve d'attente d'une capacité de 400 l. Une pale en rotation lente équipe cette cuve et empêche la sédimentation du coulis. Une fois malaxé, le coulis est déversé dans la cuve d'attente avant l'injection, qui s'effectue par une pompe à piston. Dans la seconde campagne, on a utilisé une centrale d'injection comprenant un malaxeur à haute turbulence de la société VSL, de type Mixopress. D'une contenance de 76 l, cette unité est équipée d'une cuve d'attente d'une capacité de 100 l et d'une pompe à injection à vis d'Archimède.

Les essais de contrôle des caractéristiques du coulis (fluidité, exsudation, résistances mécaniques, temps de prise, densité, retrait, etc.) ont été réalisés conformément aux normes en vigueur.

Dispositifs d'essais

Des équipements particuliers ont permis la réalisation des tubes de 5 et 20 m. Leurs caractéristiques sont données ci-après :

- tubes PVC transparents de 80 mm de diamètre intérieur pouvant résister à une pression intérieure d'au moins 1 Mpa ;
- gaine PEHD de 70 mm de diamètre intérieur ;
- gaine feuillard de 80 mm de diamètre ;
- gaine PVC souple avec spirale métallique de 60 mm de diamètre intérieur ;
- torons de type T15,2 – 1770 – TBR – A – TU(SC), fils lisses de 5 mm de diamètre, torons avec interstices obstrués (cirés) ;
- petits matériels (vannes quart de tour, etc.).

Fabrication des coulis

Les coulis ont été préparés en respectant la procédure de malaxage suivante :

- introduction dans le malaxeur de l'eau préalablement pesée ;
- introduction de l'adjuvant prédosé ;
- malaxage pendant 1 minute ;
- introduction du ciment, puis malaxage pendant 4 à 5 minutes. Le temps t_0 correspond à l'instant de fin de malaxage du coulis ;

Protocole d'injection et de remplissage

Pour les tubes de 5 m, la procédure, conforme à la procédure d'avis technique (Fascicule spécial 99-11, 1999), est la suivante :

- injection en partie basse (vitesse = 5 m/min) ;
- écoulement de 5 l en partie haute puis fermeture de la vanne supérieure ;

- mise en pression (0,5 MPa) pendant 1 minute puis fermeture de la vanne inférieure.

En cas de repoussage après 1 heure, on applique la procédure suivante :

- réouverture de la vanne supérieure ;
- injection par la vanne inférieure ;
- écoulement de 5 l en partie haute puis fermeture de la vanne supérieure ;
- mise en pression (0,5 MPa) pendant 1 minute puis fermeture de la vanne inférieure.

Le tube de 1 m est rempli par gravité soit jusqu'à une hauteur de 0,80 m (1997), soit en totalité puis bouché hermétiquement (1998).

Concernant les gaines de 20 m, la vitesse d'injection était de 8 à 9 m/min, donc comparable à celles rencontrées dans la pratique (8 à 14 m/min). À la fin du remplissage, une pression de 0,3 à 0,4 MPa est maintenue pendant au moins une minute.

Résultats et analyse des essais

Éprouvettes de 100 millilitres

Le ressuage à l'échéance de 3 heures observé sur les éprouvettes de 100 ml est inférieur ou égal à 1,5 % (cf. tableau IV). Il est nul pour les coulis C3 à C5 de la seconde campagne malgré un dosage en eau assez élevé. On pense que la faible température du coulis est à l'origine de ce résultat. Une étude spécifique est programmée (Gelade, thèse en cours) pour comprendre l'effet de la température sur la stabilité des suspensions de ciment.

Tubes de 5 mètres

Pour les tubes inclinés de 5 ou de 1 m avec torons, on observe, dès la phase d'injection, l'apparition de lignes de courant en forme « d'arêtes de poisson », ainsi que la remontée de bulles d'air et de produits d'exsudation (fig. 5 et 6). Ce phénomène, qui se développe pendant 5 heures environ, conduit à une accumulation des produits en partie haute. Les lignes de courant ne sont pas observées pour les tubes ne contenant pas de toron, ce qui conduit pour ces derniers à un volume d'exsudat nul et une quantité d'air très faible, voisine de 0,1 %. La présence des torons accentue donc la remontée d'air, qui provient très probablement des espaces entre les fils, espaces progressivement occupés par le coulis. En effet, lorsque les espaces entre les fils des torons sont obstrués par de la cire ou lorsqu'on utilise des fils lisses, le ressuage redevient très faible (fig. 7).

On montre aussi que l'essai a une bonne sensibilité aux variations de teneur en eau du coulis (le ressuage varie de 1,5 à 4,4 % lorsque le rapport e/c varie de 0,34 à 0,38 (fig. 8). Le problème de la reproductibilité a été abordé au cours de ces essais. Elle est assez satisfaisante, malgré les différences de méthode de détermination du

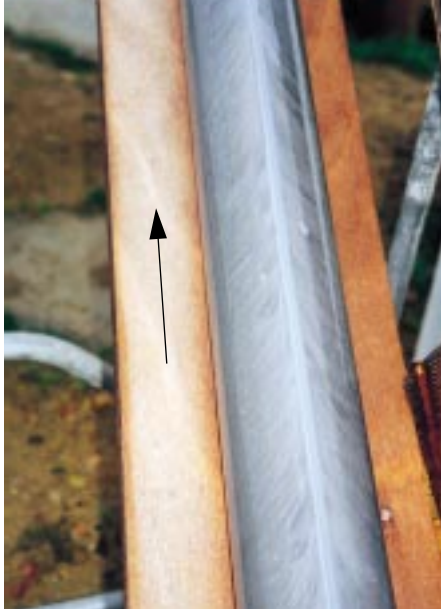


Fig. 5 - Lignes de courant en forme « d'arêtes de poisson ».



Fig. 6 - Accumulation de produits délétères en partie haute des tubes.

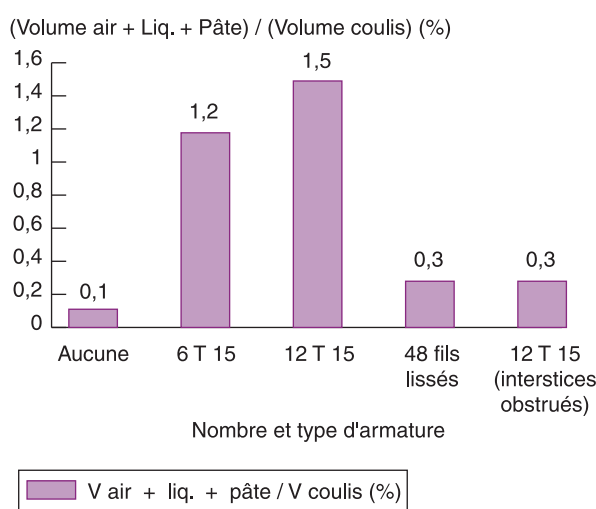


Fig. 7 - Influence du nombre et du type d'armatures sur le ressuage pour les tubes de 5 mètres.

volume des produits délétères. On conseille à ce sujet de mesurer et non de calculer ces volumes. Sans faire de calcul statistique, car le nombre d'essais est insuffisant pour cela, on peut estimer pour l'instant l'incertitude de mesure de l'exsudation à $\pm 0,2$ point (une lecture de 1 % peut donc être comprise entre 0,8 et 1,2 %). Les conditions d'essais de la seconde campagne (température faible qui a réduit fortement l'exsudation prévisible) n'ont par permis d'évaluer la répétabilité de l'essai. Il faudra sans doute l'étudier de nouveau.

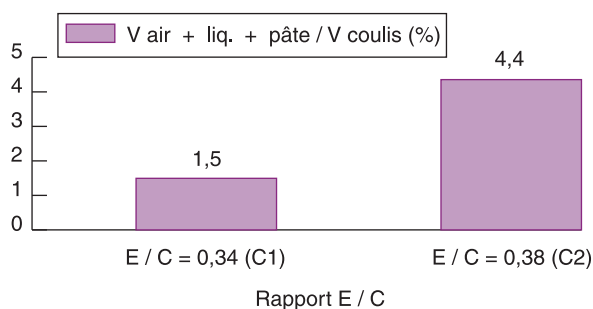


Fig. 8 - Influence du rapport e/c sur le ressuage obtenu avec les gaines de 5 m (moyenne des deux laboratoires).

À l'issue de ces deux campagnes, les points suivants ont été validés (tableaux V et VI) :

- le choix de douze torons pour l'essai permet d'avoir un taux de remplissage usuel proche de 40 %, taux rencontré sur chantier, et d'accentuer la remontée d'air et d'eau par l'effet de filtre de ces torons, phénomène qu'on n'observe pas avec d'autres armatures ;
- le PVC est le meilleur choix pour la gaine, tant du point de vue de la facilité de montage (facilité de collage) que de la possibilité d'observation pendant l'essai (transparence). De plus, les résultats sont très proches de ceux obtenus sur feuillard (fig. 9) ;
- l'inclinaison donnée aux gaines permet de prendre en compte l'effet Boycott, effet qui amplifie le volume d'air et d'eau par rapport à la verticale. Les résultats sur tubes de 5 et 1 m ont permis de mettre en évidence l'existence d'un optimum situé entre 30 et 60 degrés (cf. paragraphe suivant) (fig. 10 et 11) ;
- l'opération de repoussage effectué sur les coulis (C1 à C3) une heure après l'injection limite légèrement le phénomène (de 10 à 20 % des volumes d'air et de produit délétère) mais ne l'empêche pas.

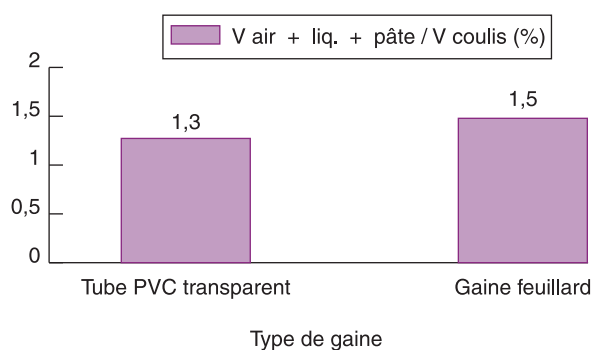


Fig. 9 - Ressuage obtenu sur les tubes de 5 m pour les deux types de gaine.

Tubes de 1 mètre

Cet essai traduit bien l'effet de filtration des torons (fig. 12), que ce soit par l'augmentation du volume d'air (seconde campagne) ou du volume de gel surna-

TABLEAU V
Résultats des essais sur tube de 5 m : volumes d'air, de liquide et de pâte mesurés à 24 h (campagne 1997)

N° essai (cf. tableau II)	Vair (ml)	Vair/Vcoulis (%)	V(liq. + pâte) (ml)	V(liq. + pâte)/ Vcoulis (%)	Vair + liq. + pâte (ml)	Vair + liq. + pâte/Vcoulis (%)
T5-97-1	*				220	1,3
A5-97-1	110	0,6	180	1,1	290	1,7
T5-97-2	*				305	1,4
A5-97-2	185	0,9	0	0,0	185	0,9
T5-97-3	*				15	0,1
A5-97-3	25	0,1	0	0,0	25	0,1
T5-97-4	*				15	0,1
A5-97-4	85	0,5	0	0,0	85	0,5
T5-97-5	*				*	*
A5-97-5	70	0,3	0	0,0	70	0,3
T5-97-6	*				200	1,1
A5-97-6	185	1,1	65	0,4	250	1,5
T5-97-7	*				75	0,4
A5-97-7	115	0,7	90	0,5	205	1,2
T5-97-8	*				40	0,2
A5-97-8	100	0,6	125	0,7	225	1,3
T5-97-9	*				160	1,0
A5-97-9	150	0,9	110	0,6	260	1,5
T5-97-10	*				680	4,0
A5-97-10	235	1,4	570	3,4	805	4,8
T5-97-11	*				430	2,5
A5-97-11	315	1,8	375	2,2	690	4,0

* Volume d'air non évalué.

TABLEAU VI
Résultats des essais sur tube de 5 m : volumes d'air, de liquide et de pâte mesurés à 24 h (campagne 1998)

N° essai (cf. tableau I)	Vair (ml)	Vair/Vcoulis (%)	V(liq. + pâte) (ml)	V(liq. + pâte)/ Vcoulis (%)	Vair + liq. + pâte (ml)		Vair + liq. + pâte/Vcoulis (%)	
					m	s	m	s
A5-98-1 à 6	8 (moyenne)	0,04	non mesurable	non mesurable	8	6	0,04	0,03

m, s : moyenne et écart-type de six résultats (valeurs arrondies).

geant et d'eau (première campagne). On remarque une bonne sensibilité de l'essai aux variations de teneur en eau du coulis (tableau VII), car, dans le cas du tube incliné contenant six torons, lorsque le rapport e/c varie de 0,34 à 0,38, l'exsudation est pratiquement quadruplée (fig. 12). Les essais de 1998 ont été améliorés par rapport à ceux de 1997 car ils ont permis de mesurer des volumes d'air en plus de l'exsudation. On montre ainsi qu'un coulis ne produisant pas (ou peu) d'exsudation peut laisser remonter l'air, entraîné pendant le malaxage et l'injection, en partie haute des tubes (tableau VIII). Par ailleurs, l'angle pour lequel l'exsu-

dation est maximale se situe entre 30 et 60 degrés dans l'essai au tube de 1 m. Acrivos et Herbolzheimer (1979) ont étudié l'effet Boycott sur des suspensions de billes de verre de 137 µm de diamètre en suspension dans une huile, à des concentrations variant de 1 à 10 %. Les expériences, conduites entre deux plans parallèles dont l'inclinaison varie de 40 à 90 degrés par rapport à l'horizontale, ont montré que la vitesse de sédimentation diminue avec l'inclinaison jusqu'à la valeur maximale obtenue pour 40 degrés. Mais on ne sait pas si cette valeur correspond à un extremum. Dans le cas présent, c'est la remontée de l'air qui est favori-

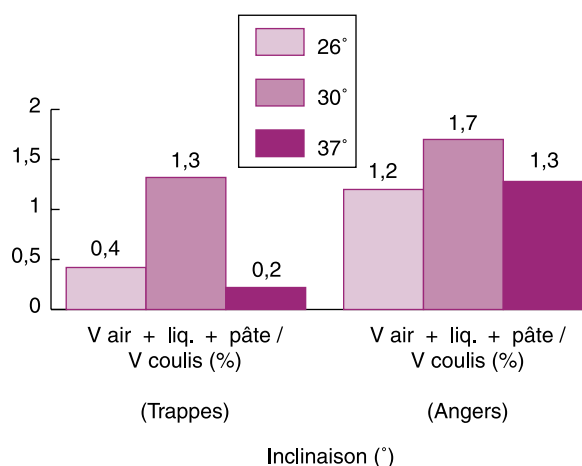


Fig. 10 - Influence de l'inclinaison des gaines de 5 m sur le ressuage.

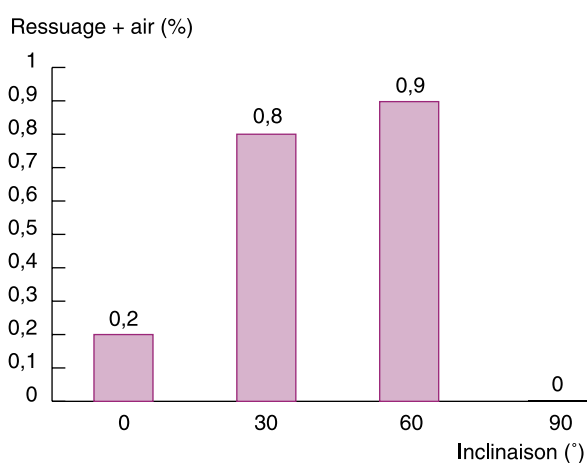


Fig. 11 - Influence de l'inclinaison sur les volumes d'air et de liquide observés sur les tubes de 1 mètre.

sée par l'inclinaison plutôt que l'augmentation de la sédimentation, mais la sédimentation serait aussi accélérée si elle était significative. L'évaluation de la répétabilité, d'après les essais T1-98-1 à 7 (tableau VIII) a conduit à un coefficient de variation de 30 % (rapport de l'estimation de l'écart type à celle de la moyenne). Enfin, l'utilisation d'un coulis thixotrope a fortement réduit le volume d'air en partie haute (coulis T1-98-23 à 25, tableau VIII). Les bulles d'air sont bloquées dans

le mélange grâce à l'augmentation du seuil d'écoulement du coulis en fonction du temps, comme dans un gel.

L'essai au tube de 1 m, représentatif des conditions réelles d'injection et dont la mise en œuvre demeure relativement aisée, est donc à promouvoir dans le cadre des contrôles de chantier, où il pourrait remplacer avantageusement l'essai d'exsudation sur tube de 100 ml du fascicule 65 A.

TABLEAU VII
Résultats des essais sur tube de 1 m :
volumes de liquide et de pâte à 24 h (campagne 1997)

N° essai (cf. tableau II)	V(liq. + pâte) (ml)	V(liq. + pâte)/Vcoulis (%)
T1-97-1	32	0,9
T1-97-2	24	0,6
T1-97-3	14	0,4
T1-97-4	4	0,3
T1-97-5	127	3,5
T1-97-6	40	1
T1-97-7	14	0,4
T1-97-8	16	0,4

Gaines de 20 mètres

Progression du coulis

Les essais ont permis de faire les observations suivantes, qui sont spécifiques à la géométrie étudiée :

- dans les parties descendantes, le coulis a un écoulement avec surface libre, qui suit la pente de la gaine ;
- dans les parties montantes, le coulis progresse en pleine section selon un régime laminaire avec un front quasiment horizontal ;
- au passage du point haut central, le coulis qui progressait en pleine section avec une vitesse de l'ordre de la vitesse moyenne d'injection s'effondre brutalement et s'écoule avec une vitesse plus importante, car il n'occupe pas toute la section de la gaine.

La cinématique de remplissage de la gaine se décompose en trois phases (fig. 13).

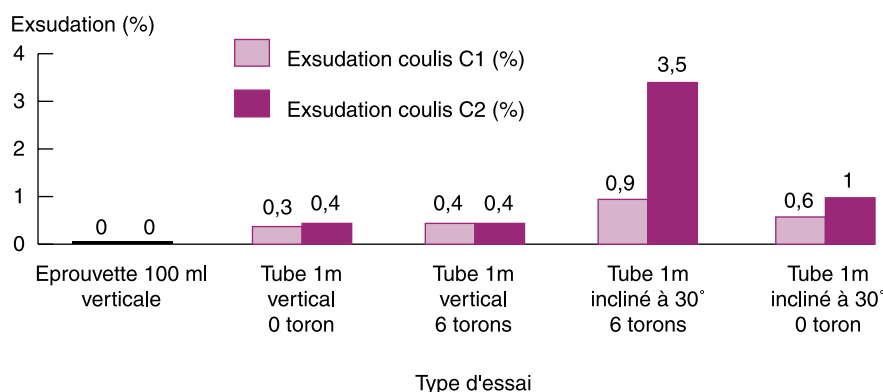


Fig. 12 – Influence du nombre de torons et de l'inclinaison sur le ressuage obtenu avec les tubes de 1 mètre.

TABLEAU VIII
Résultats des essais sur tube de 1 m : volumes d'air, de liquide et de pâte mesurés à 24 h (campagne 1998)

N° essai (cf. tableau II)	Vair (ml)		Vair/Vcoulis (%)	V(liq. + pâte) (ml)		V(liq. + pâte)/ Vcoulis (%)	Vair + liq. + pâte (ml)		Vair + liq. + pâte/Vcoulis (%)	
	m	s	m	m	s	m	m	s	m	s
T1-98-1 à 7	27	7	0,7	3	2	0,1	30	7	0,8	0,2
T1-98-8 à 10	–	–	0,2	–	–	0,0	–	–	0,2	0,0
T1-98-11 à 13	–	–	0,8	–	–	0,1	–	–	0,9	0,3
T1-98-14 à 16	–	–	0,0	–	–	0,0	–	–	0,0	0,0
T1-98-17 à 20	–	–	0,3	–	–	0,0	–	–	0,3	0,2
T1-98-21 et 22	–	–	0,1	–	–	0,1	–	–	0,2	0,1
T1-98-23 à 25	–	–	0,1	–	–	0,0	–	–	0,1	0,0

m, s : moyenne et écart-type de plusieurs résultats (valeurs arrondies).

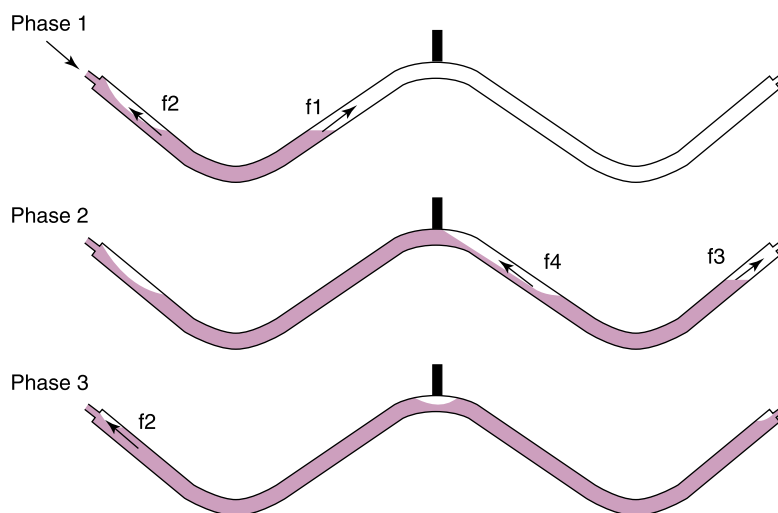


Fig. 13 - Phases de remplissage du coulis des gaines de 20 mètres.

Phase 1

Avant le passage du point haut central, on observe l'existence de deux fronts de coulis. Un front f_1 progresse dans le sens de l'injection du premier point bas vers le point haut central. Un front f_2 remonte dans un premier temps du point bas vers le point d'injection puis se stabilise, lors du passage du point haut par f_1 , en laissant un vide côté injection (fig. 14a et b).

Phase 2

Après le passage du point haut central, le coulis s'effondre dans la deuxième partie de la gaine. À partir du deuxième point bas, le coulis progresse comme lors de la phase 1. Un front f_3 avance alors vers la sortie de la gaine et un front f_4 remonte vers le point haut central. Si l'évent central est fermé, une poche d'air est automatiquement emprisonnée. Si l'évent central est ouvert, la bulle d'air et le coulis s'échappent. Quelques secondes plus tard, le coulis s'échappe par l'évent d'extrémité.

Phase 3

Une fois les événements central et de sortie fermés, le front f_2 , stabilisé lors de la première phase, reprend sa progression mais ne remplit pas complètement la gaine, laissant subsister une poche d'air, malgré l'ouverture de la vis de purge.

Le point d'injection : un point singulier

On constate que l'injection de la gaine se termine toujours au point d'injection, ce qui n'était pas *a priori* prévisible. Le remplissage de la gaine à cet endroit n'est pas bien assuré (présence de liquide et d'air). Bien que le dispositif d'injection utilisé pour l'étude ne soit pas représentatif d'une tête d'ancrage de précontrainte, on en conclut néanmoins que le point d'injection est une zone singulière, qui est à traiter avec le plus grand soin.



a. Coulis courant.



b. Coulis thixotrope.

Fig. 14 - Passage du point haut.

Comment s'effectue le passage du coulis au point haut central ?

On observe des différences de comportement entre le coulis courant et le coulis thixotrope lors du passage du point haut : alors que le front d'un coulis classique s'effondre avant d'atteindre le sommet de la gaine, celui du coulis thixotrope s'effondre au niveau de ce point haut. Cela signifie qu'avec le coulis thixotrope aucune poche d'air ne peut se former en amont du point haut lors de la phase de remplissage ; mais cela n'exclut pas la remontée en différé de bulles d'air.

Injection avec événement fermé au point haut intermédiaire

On observe dans le cas de la gaine 2.4 la formation d'une poche d'air mettant entièrement à nu les torons sur plus d'un mètre au point haut central, ce qui représente environ 1,5 l d'air (fig. 15a et b). Cela met bien en évidence l'absolue nécessité d'un événement en bon état au point haut intermédiaire pour les coulis étudiés. Cette remarque conduit à supposer que l'enrobage des

câbles de précontrainte extérieure aux points hauts intermédiaires n'est pas assuré, car il est souvent difficile de placer un événement à ces endroits (présence du déviateur en béton armé).

La procédure de purge

La méthode habituelle consiste à purger les événements un par un du point d'injection vers l'extrémité opposée. L'étude du mode de progression du coulis a montré qu'entre deux points hauts il y avait une « compétition » entre le front de coulis qui revient vers l'amont et le front de coulis qui progresse dans le sens de l'injection. Pour toutes les gaines de la maquette, lors de la première phase de remplissage, le front f_1 arrive au point haut avant que le front f_2 n'atteigne le point d'injection. Lors de la deuxième phase de remplissage, les fronts f_3 et f_4 arrivent aux points hauts en même temps. Par conséquent, les événements ont été purgés dans l'ordre suivant : événement central et événement de sortie puis événement d'injection (vis de purge), ce qui diffère de l'ordre habituelle de purge. Comme l'ordre de sortie du coulis par les événements dépend de la géométrie de la gaine (longueur de la gaine et dénivelé relative des points hauts), il est important d'en tenir compte pour établir la procédure de purge.

Résultats quantitatifs sur l'efficacité de l'injection des gaines (tableau IX et fig. 16)

Efficacité du réservoir à coulis

L'injection de la gaine 1.2 a montré que la présence des volumes de coulis tampon entre les torons et les points hauts conduit à une réduction importante du volume total des produits exsudés par rapport à la gaine 1.1 de référence. La quantité des produits exsudés passe de 470 à 120 ml à l'événement central équipé du dispositif, et de 240 à 35 ml à l'événement d'extrémité. Toutefois, la présence de ce dispositif n'a pas empêché la formation de pâte blanche aux points hauts des gaines, même s'il en a réduit le volume. Il faut noter, par ailleurs, que la très forte réduction de section entre la gaine principale et les événements de purge constitue un point singulier qui rend difficile la migration des produits exsudés depuis le corps de la gaine jusque dans les volumes tampons. Cette difficulté sera encore accrue pour les coulis thixotropes.

Efficacité du repoussage du coulis

Les opérations de repoussage du coulis ont conduit à une diminution du volume de liquide, d'air et de pâte blanche au niveau de tous les événements. Ainsi en comparant la gaine 1.1 (gaine de référence) et la gaine 1.3 (repoussage par le point d'injection), la quantité des produits exsudés passe de 470 à 130 ml à l'événement central, de 240 à 100 ml à l'événement d'extrémité, et de 360 à 100 ml à l'événement d'injection. Les résultats obtenus sur les gaines 1.3 et 1.4 montrent qu'un repoussage du coulis réalisé depuis le côté opposé à l'injection ne conduit

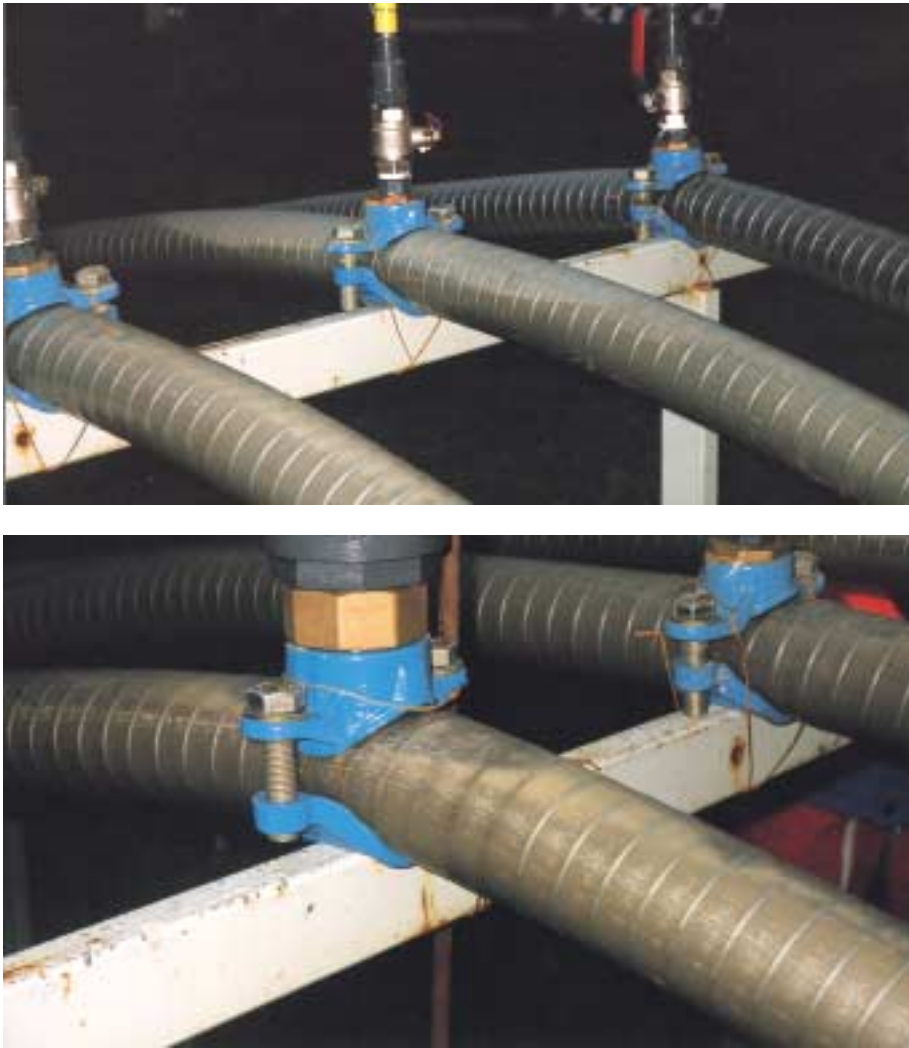


Fig. 15 - Formation d'une importante bulle d'air lorsque l'événement intermédiaire est fermé au moment de l'injection (a) et forte réduction de cette bulle avec la purge et le système de réservoir (b).

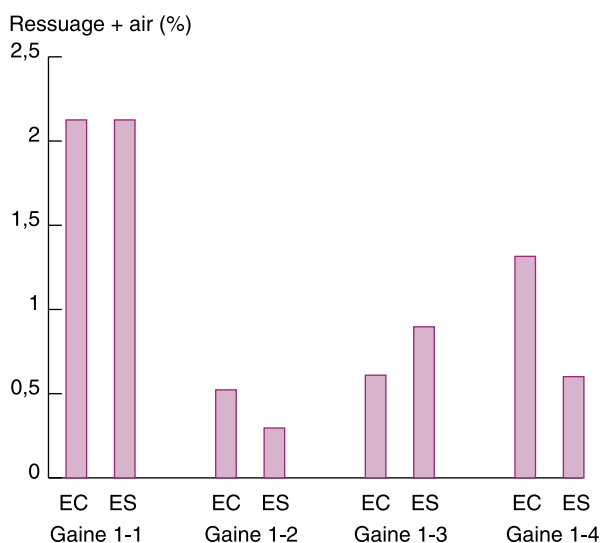


Fig. 16 - Ressuage mesuré aux points hauts des différentes gaines de 20 mètres.

pas à de meilleurs résultats. Par ailleurs, l'efficacité du repoussage a été atténuée pour deux raisons. D'une part, au moment du repoussage du coulis, les poches de produits délétères, déjà formées au niveau des points hauts, sont dispersées par le flux de coulis apporté, et seule une partie de leur volume est évacuée par les événements de purge ; d'autre part, au niveau des points hauts intermédiaires, les gaines sont pratiquement horizontales, ce qui conduit à des poches d'air et d'eau très étendues. Par conséquent, il faut une diminution très forte du volume de produit délétère pour obtenir un rehaussement sensible de la hauteur de coulis sain dans la gaine. Ces observations permettent de conclure que l'efficacité du repoussage dépend en grande partie de la position des bulles d'air emprisonnées par rapport aux différents points hauts. Par exemple, une poche d'air située en aval du point haut intermédiaire ne pourra pas être éliminée par repoussage du coulis à partir du point d'injection mais le sera à partir du point de sortie.

TABLEAU IX
Récapitulatif des mesures de volumes exsudés à 24 h sur les gaines souples de 20 m (campagne de 1997)

n° de gaine	Point d'injection				Point haut central				Point de sortie			
	V _{air} (ml)	V _{eau} (ml)	V _{total} (ml)	V _t (%)*	V _{air} (ml)	V _{eau} (ml)	V _{total} (ml)	V _t (%)*	V _{air} (ml)	V _{eau} (ml)	V _{total} (ml)	V _t (%)*
1.1	150	210	360	3,2	80	390	470	2,1	160	80	240	2,1
1.2	190	60	250	2,2	120	0	120	0,5	35	0	35	0,3
1.3	nm	nm	nm	nm	130	0	130	0,6	60	40	100	0,9
1.4	70	30	100	0,9	nm	nm	295	1,3	0	70	70	0,6

nm : non mesuré.

* Le pourcentage de volume exsudé est calculé par rapport au volume de coulis compris entre le point haut concerné et le(s) point(s) bas adjacent(s) ; soit 11,35 l pour les points d'extrémité et 22,7 l pour le point central.

Conclusions

Un des buts de cette étude était d'identifier les paramètres favorisant l'apparition de vides et d'eau dans les gaines de précontrainte : les mécanismes qui prennent naissance dans les coulis sont favorisés par des facteurs extérieurs agissant à différentes échelles. La pesanteur entraîne à l'échelle des grains un risque de sédimentation ou de tassement du coulis, mais un coulis stable dans une éprouvette verticale en laboratoire peut présenter *in situ* une forte exsudation et conduire à la formation de poches d'air.

Les poches d'air peuvent aussi se former au cours de l'injection si la procédure de purge est mauvaise, ou de manière différée plusieurs heures après la mise en œuvre. On a montré que la présence des torons et le fait que la gaine soit inclinée accentuent la formation en différé des poches d'air. L'utilisation d'un coulis thixotrope réduit fortement le volume de ces poches d'air, grâce à l'existence d'un seuil d'écoulement (à l'image d'un gel), ce qui conduit au blocage des bulles d'air au sein du matériau. Le système de purge est cependant nécessaire quel que soit le coulis utilisé.

Si l'instabilité du coulis génère la remontée d'eau vers les points hauts des gaines, on a montré que celle-ci est accentuée par l'inclinaison des tubes et par la présence des torons. On a montré aussi que la part principale du phénomène se développe dans l'espace entre les fils des torons. Cependant, la matière de la gaine et la présence de reliefs annulaires (feuillard métallique) ne modifient pas de manière significative le ressuage et le volume de la poche d'air.

Le dispositif de purge traditionnel disposé au point haut joue correctement son rôle dans la phase d'injection. Toutefois, une fois que cette purge est fermée, on n'empêche pas la remontée en différé des produits d'exsudation.

Le réservoir de coulis est une solution qui permet de diminuer la formation différée des poches d'air même si, dans le cas présent, l'efficacité du dispositif pourrait encore être améliorée. Remarquons toutefois qu'un coulis thixotrope réduira fortement l'efficacité du réservoir, puisque l'apparition d'un seuil d'écoulement

empêchera la vidange de celui-ci, du moins si le seul moteur est la gravité.

Le repoussage du coulis, bénéfique pour les coulis couvrants de l'époque, notamment par l'évent de sortie, est une technique qui devrait être étudiée avec des coulis thixotropes.

On a démontré aussi que l'essai au tube incliné de 5 m décrit dans le règlement de l'avis technique est approprié, car les effets de l'inclinaison de la gaine et de la présence de torons, et les effets limités du repoussage sont pris en compte. De plus, l'essai permet de valider en même temps l'adéquation du matériel de chantier aux propriétés du matériau.

Les résultats obtenus sur les tubes de 1 m sont prometteurs car ils permettent d'ores et déjà de proposer cet essai pour les épreuves de convenance sur chantier en remplacement de l'essai sur éprouvette de 100 ml. Il peut aussi être très utile aux formulateurs.

L'appréciation de la stabilité des différents coulis utilisés dans cette étude a permis de confirmer les règles de formulation déjà connues. La teneur en eau du coulis a une grande influence sur la stabilité, puisque le ressuage obtenu dans l'essai au tube incliné de 5 m est triplé lorsque le dosage en eau passe de 34 à 38 l pour 100 kg de ciment. L'utilisation sur chantier d'un système précis de dosage en eau est donc importante. On remarque aussi que les coulis thixotropes ont l'avantage de limiter la remontée de l'air, donc de réduire la formation en différé des poches d'air aux points hauts.

Il subsiste néanmoins des besoins en recherche. Outre les travaux en cours portant sur les mécanismes de sédimentation, sur la « filtration » et sur l'effet de la température sur ces mécanismes, il reste à étudier certains aspects des techniques d'injection. Le développement en cours de coulis dont les propriétés rhéologiques sont complexes (fluides à seuil, forte thixotropie) rend nécessaire une bonne compréhension des écoulements dans les gaines. On s'interroge aussi sur les différences d'écoulement dans le cas des câbles tendus, sur l'efficacité des dispositifs de purge des systèmes d'ancrage et sur l'amélioration possible du remplissage par injection sous vide.

- ACRIVOS A., HERBOLZHEIMER E. (1979), Enhanced sedimentation in settling tanks with inclined walls, *Journal of fluid mechanics*, vol. 92, part 3, pp. 435-457.
- BASTIEN J., DUGAT J., PRAT E. (1997), Cement grout containing precipitated silica and superplasticizers for post-tensioning, *ACI materials journal*, 5, vol. 94, pp. 291-295.
- BOYCOTT A.E. (1920), Sedimentation of blood corpuscles, *Nature*, 104, 532.
- CHAUSSIN R., CHABERT A., CUSSIGH F. (1998), *La maîtrise des problèmes d'injection des câbles de précontrainte*. La technique française du béton précontraint, AFPC-AFREM, XIII^e congrès FIP, Amsterdam, pp. 91-98.
- Concrete Society (1996), *Durable bonded post-tensioned concrete bridges*, Technical report 47, The working party of Concrete Society.
- DIEDERICHS U., SHUTT K. (1989), *Silica fume modified grouts for corrosion protection of post-tensioning tendons*, Comptes rendus du Symposium ACI/CANMET on Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, pp. 1173-1195.
- DUGAT J., CHEYREZY M., BASTIEN J. (1996), *Post-tensioned cement grout containing precipitated silica*, Comptes rendus du symposium FIP, Londres, pp. 651-658.
- Fascicule 65-A (1992). Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux, fascicule 65A et additif, *Exécution des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint par post-tension*, décret n° 92-72 du 16 janvier.
- Fascicule spécial 99-11 (1999), Circulaire n° 99-54 du 20 août 1999 instituant un avis technique des coulis d'injection pour conduits de précontrainte délivré par la Commission Interministérielle de la Précontrainte, *Bulletin officiel*, septembre.
- GELADE P. (en cours), *Étude de la sédimentation des coulis d'injection pour la post tension*, Thèse LCPC/Université Paris VII, en cours.
- GODART B. et al. (1999), Ponts en béton précontraint par post-tension, problèmes rencontrés en France, dans *Ponts en béton précontraint par post-tension, rapport franco-britannique sur l'état de l'art*, publié par Thomas Telford, Londres, pp. 55-67.
- JUFROY C. (1994), *Sédimentation d'une suspension, effet Boycott*, Thèse de Doctorat es-sciences physiques, option Génie des procédés, Paris VII.
- LE ROY R., XA KHIEN H., SERRANO J.-J. (1998), *Principes de formulation des coulis d'injection pour la post-tension*. La technique française du béton précontraint, AFPC-AFREM, XIII^e congrès FIP, Amsterdam, pp. 143-152.
- LUTHER D.C., HUYNH T.L., MELLIER P. (1996), *The hibernia offshore platform*, Comptes rendus du symposium FIP, Londres, pp. 82-91.
- SETRA-LCPC (1996), *Note d'information LCPC/SETRA*, 21, juillet.
- RAISS M. (1995), Post-tensioned concrete bridges : the UK debat, *Concrete*, pp. 23-26, mars-avril.
- RANISCH E.-H., ROSTASY F.S. (1989), *Properties of cement grouts with silica fume addition for the injection of post-tensioning ducts*, Comptes rendus du Symposium ACI-Canmet on fly ash, silica fume, slag and natural pouzzolanes in concrete. Trondheim, SP 114-56, pp. 1159-1171.
- ROSTASY F.S., GUTSCH A.W. (1996), *Ways to improve reliability of the grouting of tendons*, Comptes rendus du symposium FIP, Londres, pp. 65-74.
- SCHOKKER A.J. et al. (1998), *High performance grout development for corrosion protection of post-tensioning tendons*, Convention de printemps de l'ACI, Houston.
- TILLY G.P., WOODWARD R.J. (1996), *Development of improved grouting for post-tensioned bridges*, Comptes rendus du symposium FIP, Londres, pp. 55-64.
- XA KHIEN H. (1997), *Optimisation des coulis d'injection pour gaines de précontrainte*, Mémoire de DEA « Matériaux avancés et ingénierie des enveloppes », ENS Cachan, LCPC.

Remerciements. Les auteurs remercient les partenaires et collaborateurs qui ont contribué à la préparation et la réalisation de cette étude, et particulièrement François Cussigh et Louis Demillecamps de GTM Construction, Hervé Belbeoc'h du Syndicat des entreprises distributrices de procédés de précontrainte, Christophe Pauchon du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers, Jean-Joseph Serrano, Alain Chabert, et Philippe Touzé du LCPC, et enfin Robert Chaussin de la Mission d'inspection spécialisée des ouvrages d'art.

ABSTRACT

Identifying the parameters that encourage the formation of air pockets and water pockets in cement grouts for prestressing ducts

R. LE ROY, M. WILLAERT, D. ROUANET, H. MIRMAND

This study aimed to identify the parameters which encourage water and air to collect at the high points of prestressing ducts. For this purpose two series of injection tests were conducted by the Trappes and Angers Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées. The 5 m tube injection test, as specified in the technical assessment regulations for grouting was analysed as were the various full-scale tests involving the injection of transparent ducts. These tests also attempted to find a laboratory test that could replace that currently proposed in leaflet 65A in order to measure bleeding. The full-scale duct injection study allowed the advance of the grout to be observed and showed that the extent to which the high points were filled depended on the geometry of the duct. The effectiveness of additional spaces at high points and the application of additional pressure after injection were judged to be satisfactory for non-thixotropic grouts. The tests on 5 m ducts clearly showed the importance of duct slope and the presence of strand in increasing the volumes of air and water that appear in the upper parts of ducts. It was therefore concluded that the test proposed in the technical assessment regulations for cement grouts for prestressing is quite satisfactory. Lastly, a test on a 1 m tube was proposed. This test takes account of factors that increase exsudation and the appearance of spaces at high points, and should be performed when developing mixes in the laboratory. It could beneficially replace the exsudation test described in leaflet 65A and French Standard NF P 18 359.