

Vers une meilleure maîtrise de l'injection des gaines de précontrainte

Denis ROUANET

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

Robert LE ROY*
Nicolas ROUSSEL
Christian STÉFANI

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

La prévision du bon remplissage des gaines de précontrainte passe par l'étude de l'écoulement des coulis de ciment lors du franchissement des sommets des gaines. Pour prévoir ce franchissement, on propose de comparer le débit d'injection d'une conduite inclinée à celui maximal que l'on obtiendrait si le seul moteur était la gravité. À partir d'une grandeur adimensionnelle fonction de la gravité, du diamètre et de l'inclinaison de la gaine, du débit et de la viscosité cinématique, on définit les conditions de bon remplissage sans enfermement de poche d'air. La méthode proposée, comparée à des résultats d'essais en vraie grandeur réalisés sur gaines transparentes, donne satisfaction. Des simulations extrapolées de la méthode proposée mettent en évidence l'intérêt de maintenir la viscosité du coulis à un niveau minimal pour garantir l'injection.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

IMPROVING CONTROL OVER PRESTRESSING DUCT INJECTION

For predicting a correct filling of post-tensioning ducts, it is needed to study how cement grout flows at the top of a duct. For predicting such a crossing, a comparison is proposed between the injection flux in an inclined duct, and the maximum flux, which can be reached under the only action of gravity. A dimensionless parameter depending on gravity, on duct diameter and slope, on grout flux and viscosity, makes it possible to define the conditions for a correct filling without any confined air bubble. The proposed method was compared to the results of full-size tests carried out with transparent ducts, and it was satisfactory. Some simulations drawn from the proposed method point out that grout viscosity must have a minimum value for ensuring duct filling.

FIELD: Structural engineering.

INTRODUCTION

Les résultats des recherches récentes et la mise en place d'un règlement d'avis technique sur les coulis de pré-contrainte ont permis d'améliorer grandement la protection des câbles de précontrainte par post-tension [1-3]. Les mécanismes d'instabilité des coulis à l'état frais et les facteurs amplificateurs ont été identifiés et des essais permettant la formulation de coulis stables ont été proposés. Ces progrès significatifs se devaient d'être complétés par une étude plus approfondie des méthodes d'injection des coulis, des essais préliminaires ayant déjà été réalisés [4, 5], de manière à mieux maîtriser les phases de remplissage des gaines.

Au cours d'une injection de gaine de précontrainte, les points hauts sont des points singuliers, car le front de coulis, sous l'influence de la gravité, peut s'effondrer et laisser la place à une poche d'air. Cet effondrement peut s'effectuer dans la partie descendante de la conduite. La poche d'air ainsi formée va remonter ensuite vers le point haut comme cela est décrit dans [2]. La solution couramment utilisée, qui donne satisfaction, consiste à placer des purges à ces points hauts. Cependant, l'utilisation d'un coulis à caractère thixotrope (c'est-à-dire qui se structure au repos ou sous un cisaillement faible) conduit parfois à ce que l'effondrement s'effectue à l'aval du point haut, la purge de ce dernier devenant alors inopérante. Enfin, dans le cas de la précontrainte extérieure, il n'est pas toujours possible de placer des événements.

On s'intéresse ici au franchissement des points hauts en l'absence de possibilité d'évacuation des poches d'air et on recherche les conditions pour qu'un coulis, de comportement newtonien, occupe

* A compter du 1^{er} septembre 2004 à l'ENPC, laboratoire LAMI, e-mail : leroy@lami.enpc.fr

toute la section de la gaine au passage de ces points hauts. Le problème peut être ainsi plus précisément posé : connaissant les caractéristiques géométriques de la précontrainte – pente descendante maximale et diamètre équivalent du conduit –, on cherche à prévoir si la technique et le coulis d’injection utilisés (vitesse d’injection, viscosité du coulis) permettent d’assurer le remplissage complet de la gaine. On doit ainsi déterminer un **critère de remplissage complet** d’un conduit par un fluide newtonien.

Dans cette étude, la théorie permettant d’établir un critère de remplissage des conduites de précontrainte est d’abord présentée. Cette théorie est ensuite confrontée à des essais en vraie grandeur d’injection de gaines transparentes comportant des torons de précontrainte. On conclut enfin sur l’utilisation du critère de remplissage en proposant un abaque utilisable dans les cas pratiques.

CONDITION DE REMPLISSAGE COMPLET PAR UN FLUIDE NEWTONIEN D’UN CONDUIT CIRCULAIRE INCLINÉ

Cette question a été abordée par Michallet [4] et Yalamas [5] pour des tubes circulaires décrivant un demi-cercle. Michallet conclut, à partir d’essais sur suspensions de silicone, que le remplissage d’une telle gaine est complet lorsque le nombre de Froude modifié est supérieur à $0,6 \pm 0,2$ (le nombre de Froude, qui est une grandeur adimensionnelle utilisée par les mécaniciens des fluides, s’exprime ici

par $Fr = \frac{U}{\sqrt{gd}} \left(1 + \sqrt{\frac{d}{R}} \right)$, U étant la vitesse d’injection, g la gravité, d le diamètre de la gaine et R le

rayon de courbure de sa ligne médiane). Yalamas a poursuivi les travaux par des essais d’injection de suspensions de carbonate de calcium dans des gaines transparentes de taille centimétrique décrivant un demi-cercle. L’ensemble des expériences a permis de déterminer une condition de remplissage.

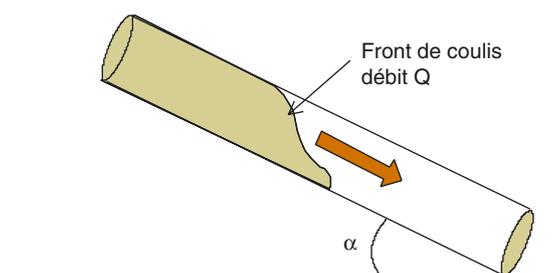
Dans un graphique exprimant une grandeur adimensionnelle $C = \frac{gd^3}{v^2}$ en fonction du nombre

de Reynolds $\frac{Ud}{v}$, v étant la viscosité cinématique, la limite entre les domaines de remplissage et de non-remplissage peut être approchée par une droite d’équation $\text{Log}C = 1,84 \text{ Log}(Re) + 0,85$. Il faut, selon cette étude, que le point représentatif des données d’écoulement soit en dessous de la droite pour qu’il y ait remplissage complet de cette conduite en demi-cercle.

Une dernière approche, intéressante dans le cadre cette étude, est proposée par Stéfani [6]. Elle consiste à comparer, pour une conduite droite inclinée (Fig. 1), le débit réel au débit gravitaire maximal (DGM), c’est-à-dire celui pour lequel le fluide, sous le seul effet de la gravité, circulerait dans la conduite en pleine section. Partant de cette idée, un nouveau critère de remplissage d’une conduite peut s’exprimer ainsi : pour qu’un fluide injecté circule en pleine section dans un conduit incliné d’un angle α sur l’horizontale, une condition suffisante est que le débit imposé au fluide soit supérieur au DGM. Il s’agit d’une condition suffisante, ce qui n’exclut pas évidemment qu’une conduite puisse être remplie pour un débit moindre. Il faut également remarquer que l’inclinaison de la conduite est un paramètre important du problème. Lorsque l’inclinaison augmente, le DGM augmente aussi, si bien que la vitesse d’injection devra être, elle aussi, plus importante.

Comme cette approche tient compte de l’inclinaison du conduit, il est apparu intéressant de la développer pour l’injection des gaines de post-tension. Une conduite de post-tension a un tracé courbe. On peut toutefois utiliser le critère théorique précédent ; il suffit pour cela de montrer que le débit réel est supérieur au DGM au point d’inclinaison maximale de la gaine entre les points hauts et bas

■ Fig. 1
Front de coulis dans un conduit circulaire incliné.



de celle-ci. On voit que l'approche de Yalamas n'est pas exploitable ici puisqu'elle a été établie pour une conduite en demi-cercle, donc pour un angle unique de conduite de 90° par rapport à l'horizontale. Les étapes de la détermination du critère d'injection sont présentées ci-dessous. Pour un fluide newtonien et dans les conditions de la figure 1, le DGM s'écrit :

$$Q = \frac{\pi g d^4 \sin \alpha}{128 \nu} \quad (\text{m}^3 / \text{s}) \quad (1)$$

où d est le diamètre du conduit (m), α l'angle d'inclinaison du tuyau sur l'horizontale (radian) et ν la viscosité cinématique du coulis (m²/s).

Par ailleurs, le débit en fonction de la vitesse d'injection s'écrit :

$$Q = \frac{\pi d^2 U_0}{4} \quad (2)$$

où U_0 est la vitesse d'injection (m/s).

On tire des relations (1) et (2) la condition de remplissage :

$$\frac{32 \nu U_0}{g d^2 \sin \alpha} \geq 1 \quad (3)$$

Pour une géométrie donnée (d, α) du conduit, on cherchera à augmenter la vitesse d'injection U_0 ou la viscosité du fluide ν pour assurer le remplissage complet. Pour des paramètres d'injection donnés (U_0, ν), il est difficilement envisageable pour un ouvrage déjà dimensionné de pouvoir modifier l'inclinaison ; on ne peut alors agir que sur le diamètre de la gaine.

APPLICATION À L'INJECTION D'UNE GAINE DE PRÉCONTRAINTÉ

Le calcul précédent est réalisé dans le cas simplifié d'un fluide visqueux et pour une conduite de section circulaire. Or, les coulis de ciment sont des fluides qui présentent dans certains cas un seuil d'écoulement et, de plus, les gaines de précontrainte sont occupées par des torons, dans une proportion d'environ 40 % en volume.

Seuil des coulis d'injection

Les coulis d'injection qui possèdent un seuil d'écoulement sont en fait thixotropes. Lorsqu'ils sont injectés juste après malaxage, ils sont déstructurés et peuvent donc être considérés comme newtoniens [7, 8]. Ce sont effectivement les conditions expérimentales qui ont été retenues dans les essais présentés ici. Cependant, certains fluides peuvent au contraire être volontairement laissés au repos avant injection à faible vitesse pour conserver le seuil, ce qui garantit une certaine tenue du front. Cette technique n'a pas été étudiée ici.

Calcul du diamètre hydraulique

La présence des torons dans la gaine réduit l'espace à injecter ; leur présence est donc *a priori* bénéfique à l'injection. On tient compte des torons en considérant, non pas le diamètre de la conduite cylindrique, mais le diamètre hydraulique [9]. Ainsi, la variable d de la formule (3) sera le diamètre hydraulique de la gaine. C'est une grandeur homogène à une longueur qui intervient dans le calcul des pertes de charge des conduites non circulaires en conditions laminaires. Sa définition est la suivante :

$$d_h = \frac{4S}{P}$$

où S est l'aire de la section occupée par le fluide et P le périmètre de cette section. Ainsi, pour un tube circulaire, le diamètre hydraulique est égal au diamètre du tube. Pour un écoulement entre deux tubes concentriques, le diamètre hydraulique est égal à la différence entre les deux diamètres. Concernant la gaine de précontrainte, on réalise le calcul du diamètre hydraulique en tenant compte de

la surface mouillée par le coulis. Cette surface est calculée en considérant que chaque fil extérieur d'un toron est au contact du coulis sur un angle de $4\pi/3$ (Fig. 2). Pour une gaine de diamètre intérieur d_g contenant n torons composés chacun de six fils périphériques de diamètre d_f , le périmètre de la section mouillée par le coulis vaut :

$$P = 4\pi n d_f + \pi d_g$$

L'aire de la section occupée par le coulis est calculée par :

$$S = \frac{\pi d_g^2}{4} - n d_f^2 \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} + \pi \right)$$

d'où l'expression du diamètre hydraulique :

$$d_h = \frac{d_g^2 - 4n d_f^2 \left(\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} + 1 \right)}{4n d_f + d_g}$$

Les valeurs de diamètre hydraulique correspondant aux expériences réalisées sont données dans le tableau I. On constate que les torons réduisent considérablement la valeur du diamètre hydraulique, et qu'il serait vain de vouloir calculer le passage des points hauts des gaines sans en tenir compte.

■ Fig. 2
Coupe d'une gaine contenant douze T15S et géométrie d'un toron.

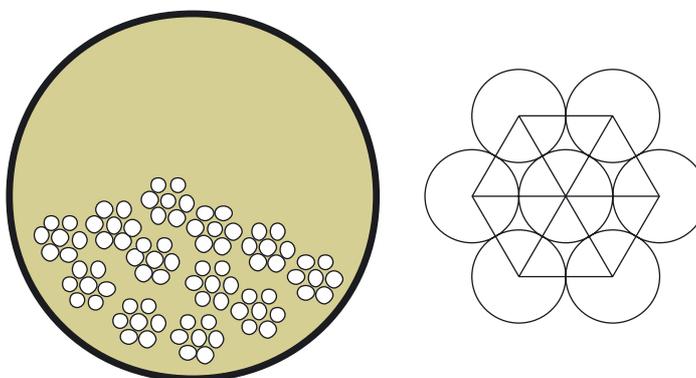


TABLEAU I
Diamètre hydraulique d_h pour les différentes expériences et pour quelques cas concrets en fonction du diamètre de gaine d_g et du nombre n de torons T15.7

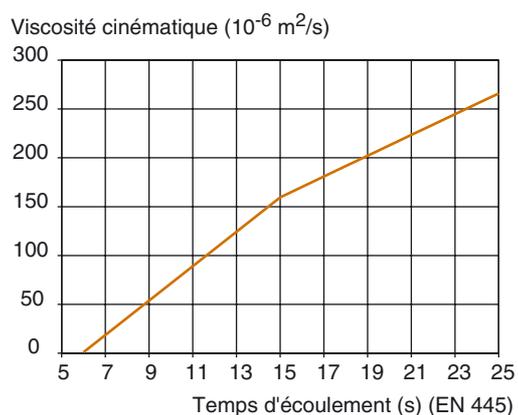
d_g (m)	n	d_h (m)
0,079	12	0,0105
0,079	0	0,0790
0,06	4	0,0183
0,06	0	0,0600
0,1	19	0,0112
0,12	31	0,0094

Calcul de la viscosité cinématique du coulis à partir de la mesure de la fluidité au cône de Marsh

Dans les expériences en vraie grandeur réalisées, la viscosité du coulis a été mesurée par l'essai de fluidité au cône de Marsh (norme EN 445). Un calcul de la viscosité cinématique a été effectuée à partir de ces mesures. On peut montrer que la viscosité cinématique d'un coulis est corrélée au temps d'écoulement au cône de Marsh. Le Roy a montré expérimentalement que, dans les conditions de la

norme EN 445 (ajutage de 10 mm et mesure du temps de passage d'un litre de coulis), la corrélation était linéaire pour les valeurs supérieures à 15 s [10]. En dessous de cette valeur, on constate un décalage entre la viscosité déterminée par un calcul analytique du débit du cône et celle déterminée expérimentalement, décalage d'autant plus grand que la fluidité est grande. Il en a été tenu compte dans la détermination de la viscosité cinématique des essais *in situ*, conformément à la figure 3. Pour construire le premier segment de droite de cette figure, on considère que celui-ci doit passer par le point représentatif de l'écoulement de l'eau dont la viscosité vaut 10^{-6} m²/s à 20 °C, et le temps d'écoulement 6 s. Une interpolation linéaire est alors proposée jusqu'à la fluidité de 15 s, valeur à partir de laquelle la viscosité est convenablement prédite.

On observe que, pour des fluidités importantes (temps d'écoulement faibles), la correction de viscosité est indispensable (première branche linéaire de la figure 3), même si cette correction est ici assez grossière. On surestimerait en effet la viscosité de près de 20 % pour un temps d'écoulement de onze secondes si l'on extrapolait le deuxième segment de la figure 3 vers la gauche.



■ Fig. 3
Viscosité cinématique en fonction du temps d'écoulement au cône de Marsh.

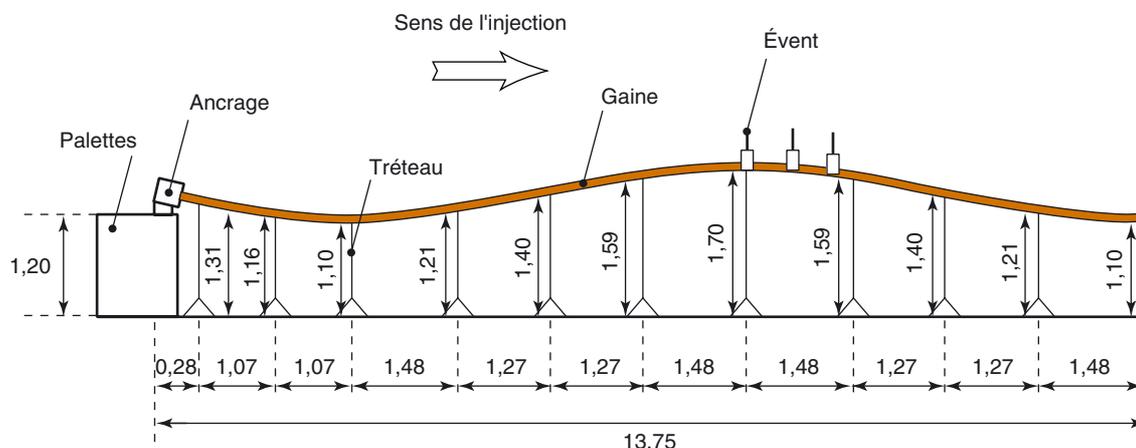
VALIDATION SUR DES ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR

Grâce aux deux campagnes d'essais de 1998 et 2001 [2], on dispose de sept essais d'injection permettant la validation de la théorie. Ces campagnes ont consisté à injecter des gaines transparentes, de deux diamètres différents, contenant ou non des torons de précontrainte de type T15.7, dans des conditions réelles de chantier (Fig. 4 et 5). La géométrie des gaines se rapproche d'un tracé de câbles d'un

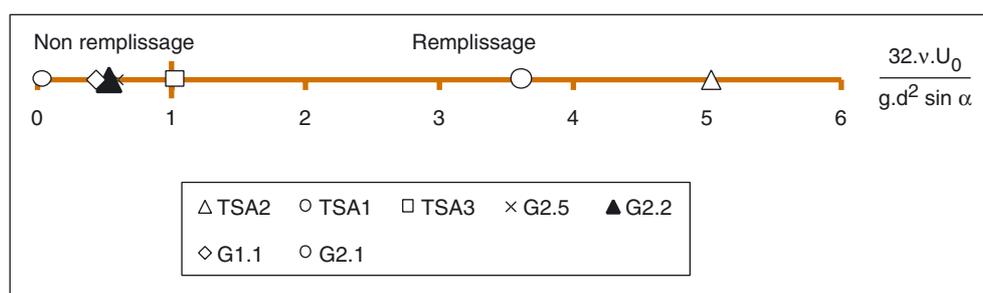


■ Fig. 4
Vue générale du dispositif d'essais d'injection au LRPC d'Angers.

passage supérieur à dalle précontrainte (PSDP). L'avancement du front de coulis, en particulier dans la partie descendante en aval des points hauts, a été observé. Les valeurs des caractéristiques des coulis, de la vitesse d'injection et de la géométrie des gaines sont données dans le tableau II, selon les méthodes définies dans le paragraphe précédent. On a estimé le nombre $32vU_0/gd^2 \sin \alpha$ pour valider la condition de remplissage des gaines sans recourir aux événements de purge (Fig. 6).



■ Fig. 5
Schéma de la moitié du dispositif de la campagne d'essais de 2001. Géométrie des gaines injectées pour les essais référencés TSA1, TSA2 et TSA3.



■ Fig. 6
Prévisions des conditions de passage des points hauts pour les sept essais en vraie grandeur. La valeur de la variable adimensionnelle doit être supérieure à 1 pour qu'il y ait remplissage. Les résultats d'essais G1.1, G2.1, G2.2 et G2.5 sont extraits de [2].

TABLEAU II
Caractéristiques des essais en vraie grandeur (d'après [2]). Le remplissage théorique est obtenu à la condition que le nombre $32U_0 \cdot v / g \cdot d^2 \sin \alpha$ soit supérieur à l'unité

Référence de la gaine	Caractéristiques principales	d_g (m)	Vitesse U_0 (m/s)	Pente de la gaine α (degré)	Fluidité en sortie de gaine (s) (EN 445)	Viscosité cinématique ($10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)	Diamètre hydraulique (m)	$\frac{32U_0 \cdot v}{g \cdot d^2 \sin \alpha}$	Remplissage théorique ?	Remplissage expérimental
TSA3	12T15S, coulis surdosé en eau, en vitesse lente	0,079	0,087	9	9,5	6,28	0,010	1,031	Oui	Non
2,1	Aucun toron	0,060	0,142	13	10	7,17	0,060	0,0415	Non	Non
1,1	4T15	0,060	0,142	13	10	7,17	0,018	0,438	Non	Non
2,2	4T15	0,060	0,087	13	14	14,23	0,018	0,533	Non	Non
2,5	4T15	0,060	0,087	13	15	16	0,018	0,599	Non	Non
TSA1	12T15S, vitesse faible	0,079	0,087	9	20,5	21,87	0,010	3,614	Oui	Oui
TSA2	12T15S, vitesse forte	0,079	0,165	9	15	16	0,010	5,030	Oui	Oui

On observe ainsi que les points représentatifs des injections référencées TSA1 et TSA2, correspondant aux injections effectuées dans la pratique pour un PSDP, sont placés dans le domaine théorique d'injectabilité. Cette prévision est satisfaisante puisque le passage des points hauts s'est effectué en pleine section. Cependant, le point représentatif de l'injection de la gaine TSA3 est situé sur la limite d'injectabilité ($32vU_0/gd^2 \sin \alpha = 1,09$). Un changement très faible des valeurs de la viscosité ou de la vitesse suffirait à faire passer ce point dans le domaine de non-remplissage. Or, à l'examen de l'enregistrement vidéo de cet essai, on observe que le front de coulis n'occupe pas toute la gaine au passage du point haut et que la purge a été nécessaire pour faire disparaître la poche d'air. L'injection de la gaine TSA1 ($32vU_0/gd^2 \sin \alpha = 3,6$), au contraire, s'est déroulé avec une grande sécurité apparente. Les essais TSA1 et TSA3 permettent alors d'encadrer le critère de remplissage :

$$1 < \frac{32vU_0}{gd^2 \sin \alpha} < 3,6$$

Compte tenu des observations expérimentales, le critère est probablement plus proche de la borne inférieure que de la borne supérieure.

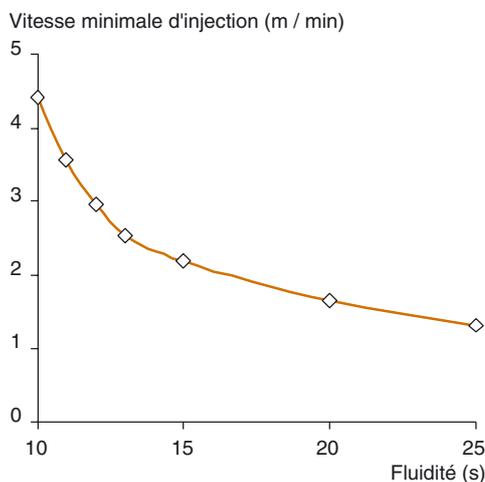
Ces expériences représentent par conséquent une première validation du critère de remplissage proposé. Cette validation a mis en lumière qu'il faut calculer, aussi précisément que possible, d'une part le diamètre hydraulique de la gaine, d'autre part la viscosité cinématique du coulis.

On tire aussi quelques enseignements de cette validation en faisant remarquer que l'essai référencé TSA3 est réalisé avec le coulis des essais TSA1 et TSA2, modifié volontairement par l'adjonction d'un excès d'eau, de l'ordre de 14 % ($e/c = 0,40$ au lieu de $0,35$), de manière à atteindre une fluidité importante (fluidité de 9,5 s). Les essais au tube de 5 m montrent que ce coulis ne présente pas de sédimentation et respecte les critères de stabilité de l'avis technique ; néanmoins, cette variation de la quantité d'eau augmente suffisamment sa fluidité pour provoquer l'effondrement du front de coulis au passage du point haut, nécessitant une purge des zones à risque.

UTILISATION PRATIQUE DU CRITÈRE DE REMPLISSAGE

À partir de la condition de remplissage $32vU_0/gd^2 \sin \alpha = K$ ($1 < K < 3,6$), on peut déterminer la limite de non-remplissage pour une précontrainte 12T15S, dont la gaine a 79 mm de diamètre intérieur et $1\,800\text{ mm}^2$ de section d'acier, en fonction de l'inclinaison maximale du tracé et des conditions d'injection. Celles-ci sont fixées par le temps d'écoulement, compris entre 13 et 25 s selon le fascicule 65A, et la vitesse d'injection, comprise entre 5 et 14 m/min avec les matériels actuels de chantier. Ainsi, pour des inclinaisons inférieures à 7° , il y a toujours remplissage sans purge. Notamment, pour les passages supérieurs à dalle pleine précontrainte (PSDP) où $\alpha \approx 5^\circ$, et dans les conditions d'injection les plus défavorables (temps d'écoulement faible de 13 s, qui est une limite inférieure du fascicule 65A, et petite vitesse de 5 m/min), la condition de remplissage est toujours satisfaite puisque : $\frac{32vU_0}{gd^2 \sin \alpha} \approx 4$.

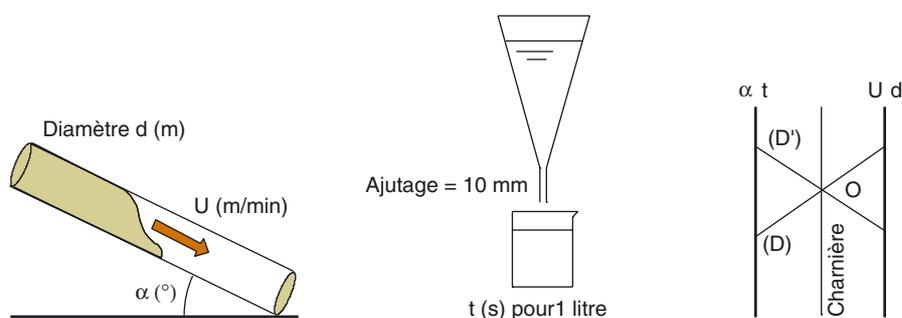
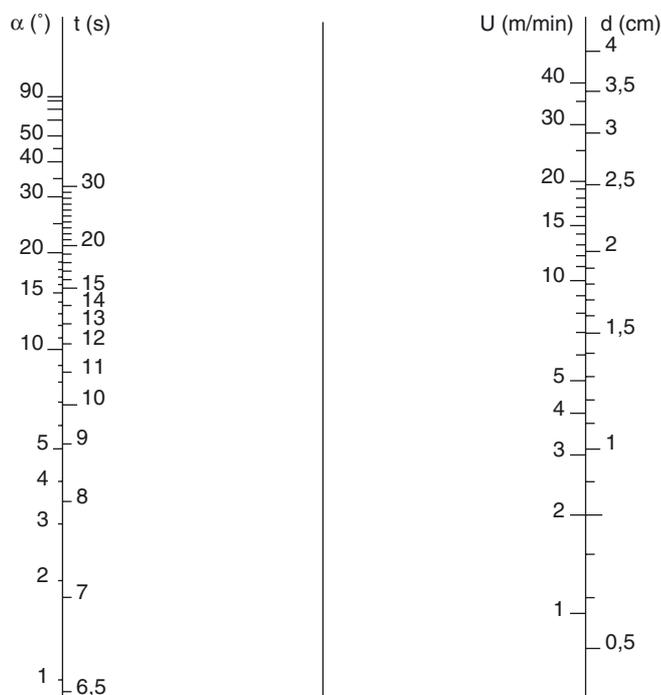
On s'aperçoit que la vitesse minimale d'injection n'est pas une fonction affine de la fluidité (Fig. 7). Il faut ainsi doubler la vitesse d'injection lorsque la fluidité passe de 15 s à 10 s, alors que cette même



■ Fig. 7
Vitesse minimale en fonction de la fluidité au cône de Marsh selon l'EN 445 et pour $d_h = 0,0105\text{ m}$ (12 T15S) et une inclinaison de la conduite de 10° . Courbe tracée par $K = 1$.

vitesse change peu pour les fluidités comprises entre 15 et 20 s. On comprend ainsi qu'il est plus sûr d'utiliser un coulis dont la fluidité est située dans le domaine de faible variation de la vitesse minimale d'injection.

Pour une utilisation pratique du critère, on pourra se reporter à l'abaque de la figure 8, établi lui aussi pour la borne inférieure du critère, laissant ainsi à l'utilisateur le choix du coefficient de sécurité. Quelques exemples de diamètres hydrauliques courants sont donnés dans le tableau I, afin de faciliter l'utilisation de l'abaque.



■ Fig. 8

Abaque permettant de calculer les conditions de remplissage d'une gaine inclinée.

Exemple d'utilisation : d et α étant donnés, on relie les valeurs par la droite (D) qui intercepte la charnière en O. Étant donné un temps d'écoulement t , on trace (D') passant par O et on obtient alors la vitesse minimale U .

CONCLUSIONS ET BESOIN D'ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES

Dans cette étude, on définit un critère d'injectabilité fondé sur la possibilité qu'a un fluide de s'écouler en pleine section dans une conduite sous l'effet de la pesanteur. On applique ensuite ce critère au cas des coulis d'injection de gaines de précontrainte. Pour cela, la détermination du diamètre hydraulique de la gaine a été effectuée, ainsi que celle de la viscosité cinématique des coulis à partir de la

seule mesure de fluidité au cône de Marsh. Le critère d'injectabilité a ainsi pu être validé sur sept essais en vraie grandeur. Les résultats obtenus sont satisfaisants au vu de la simplicité de la méthode. On dispose donc d'un outil pour prévoir les injections sans purge. Cet outil peut être appliqué aux cas où la purge des gaines n'est pas possible à leurs sommets, ce qui est le cas de la précontrainte extérieure. Dans la pratique, pour pallier les incertitudes du modèle et celles liées aux variations de vitesse d'injection ou de viscosité du coulis, il faut prendre un coefficient de sécurité par rapport au critère défini ici. Ce coefficient de sécurité ne devrait pas dépasser 4, pour fixer un ordre de grandeur. Cette étude a été effectuée pour des coulis à comportement purement visqueux. Dans la pratique, les coulis mis en œuvre ont un comportement assez proche de celui-ci, du fait qu'ils sont injectés juste après déstructuration, soit par malaxage, soit par brassage dans une cuve d'attente. Bien que peu répandu, il existe sur le marché français au moins un coulis à forte thixotropie dont le comportement ne peut être contrôlé au cône de Marsh, mais avec un scissomètre. Dans ce cas, la méthode ne peut plus s'appliquer, car c'est au contraire une injection à vitesse faible qui apportera les meilleurs résultats. Plus généralement, une étude spécifique sur le comportement des fluides thixotropes est en cours au LCPC. Elle devrait permettre d'énoncer de nouvelles recommandations pour l'injection de tels matériaux. Le cas des cires, dont le comportement rhéologique n'est pas encore bien connu, reste aussi à traiter.

Remerciements : Les auteurs remercient le Syndicat des entreprises distributrices de la précontrainte (SEDIP) pour son aide dans la définition du programme expérimental des essais en vraie grandeur et leur financement. Ils remercient aussi Thierry Yalamas et Olivier Coussy pour leur contribution théorique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GELADE P., LE ROY R., BOUCENNA I., FLAUD P., Stability of cement grout : study of sedimentation phenomena, *Applied Rheology*, vol. 12, **1**, 2002, pp. 12-17.
- [2] LE ROY R., WILLAERT M., ROUANET D., MIRMAND H., Identification des paramètres favorisant la formation des poches d'air et d'eau dans les coulis de ciment pour gaines de précontrainte, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **229**, 2000, pp. 53-69.
- [3] Fascicule spécial 99-11, Circulaire n° 99-54 du 20 août 99 instituant un avis technique des coulis d'injection pour conduits de précontrainte, délivré par la commission interministérielle de la précontrainte, *Bulletin officiel*, **1999**, 37 pages.
- [4] MICHALLET H., MATHIS C., MAÏSSA P., DIAS F., Flow filling a curve pipe, *Journal of fluids engineering*, vol. 123, **2001**, pp. 686-690.
- [5] YALAMAS T., *Analyse théorique du phénomène de remplissage des conduites présentant un point haut, par des fluides newtoniens ou à seuil, et mise en place d'un système d'étude expérimental*, Rapport de Magistère de Génie Civil 2^e année, LCPC, Paris, **1999**.
- [6] STÉFANI C., *Remplissage gravitaire d'un tuyau incliné*, communication privée, **1998**.
- [7] JARNY S., ROUSSEL N., BERTRAND F., RODTS S., TOCQUER L., HUYNH H.T., LE ROY R., COUSSOT P., Thixotropie des pâte cimentaires, *Actes des journées scientifiques et techniques du LCPC, JSI 2003*, **2003**, pp. 127-132.
- [8] QUEMADA D., Rhéologie et structure des suspensions concentrées dans *Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable*, Ildefonse B., Allain C. Coussot C., Cémagref édition, **1997**.
- [9] *Techniques de l'ingénieur*, Écoulement des fluides, BL 4, A 738 6-8.
- [10] LE ROY R., ROUSSEL N., The marsh cone : theoretical analysis and practical limits, à paraître dans *Materials and Structures*, **2004**.