



Laboratoire Central  
des Ponts et Chaussées

**techniques et méthodes**  
des laboratoires des ponts et chaussées



**Méthode d'essai des lpc n°65**

**Essai de stabilité  
des coulis de ciment  
au tube incliné d'un mètre**

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

## Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,  
de l'Aménagement et des Transports  
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne  
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : [diffusion-publications@ifsttar.fr](mailto:diffusion-publications@ifsttar.fr)

[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)





# Essai de stabilité des coulis de ciment au tube incliné d'un mètre

## Méthode d'essai n° 65

Avril 2007



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
58, boulevard Lefebvre - 75732 Paris Cedex 15

Ce document a été rédigé par :

- J. AUBRY, B. BOULET, P. DANTEC, G. PRIOLET (Laboratoire régional des ponts et chaussées de Clermont-Ferrand),
- S. LEFEBVRE, G. VANHEMELSDAELE, D. ROUANET (Laboratoire régional des ponts et chaussées d'Angers),
- E. JANISSE, D. PETOT, M. WILLAERT (Laboratoire régional des ponts et chaussées de l'Ouest Parisien),
- R. LE ROY (UMR-NAVIER, LAMI).

Ce document est disponible au :

**Laboratoire central des ponts et chaussées**

DISTC-Diffusion des Éditions

58, boulevard Lefebvre

F-75732 Paris Cedex 15

Téléphone : 01 40 43 50 20

Télécopie : 01 40 43 54 95

Internet : <http://www.lcpc.fr>

Prix : **20 Euros HT**

En couverture : Tube incliné en cours d'injection au coulis de ciment.

Ce document est propriété du Laboratoire central des ponts et chaussées et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général (ou de ses représentants autorisés)

© 2007 - LCPC  
ISBN 2-7208-2486-0

1. <i>Objectif et domaine d'application</i> .....	5
2. <i>Références réglementaires et normatives</i> .....	5
3. <i>Principes physiques mis en jeu</i> .....	6
<b>Effet Boycott</b> .....	6
<b>Effet de filtration</b> .....	7
4. <i>Appareillage</i> .....	8
5. <i>Confection de l'éprouvette</i> .....	8
6. <i>Fabrication du coulis</i> .....	8
7. <i>Remplissage du tube d'un mètre</i> .....	9
8. <i>Mesures des volumes</i> .....	10
9. <i>Expression des résultats</i> .....	11
10. <i>Répétabilité de la mesure</i> .....	12
11. <i>Bibliographie</i> .....	12



## 1. Objectif et domaine d'application

L'objet de cet essai est de caractériser la stabilité d'un coulis d'injection pour conduits de précontrainte en tenant compte des effets dus, d'une part, à la présence des torons, et, d'autre part, à l'inclinaison de la conduite. L'objectif est de s'assurer de la qualité du produit en vue d'un remplissage complet des conduits de précontrainte et d'une protection durable des câbles mis en œuvre dans les ouvrages d'art. Cet essai permet, à une échelle proche d'une section réelle de gaine, de vérifier que la formulation et la méthode de fabrication du coulis conduisent à un matériau stable et homogène en place.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'eau ressuée et la quantité d'air accumulée à la surface d'un coulis de liant hydraulique dans un conduit transparent incliné, muni de torons, rempli par gravité et laissé au repos à l'abri de toute évaporation. Cet essai permet la vérification de la stabilité du coulis à 24 heures. Il est notamment utilisable :

- en laboratoire, dans le cadre de la mise au point de formules de coulis,
- sur chantier, dans le cadre des éprouves de convenance avant le démarrage des injections sur l'ouvrage.

## 2. Références réglementaires et normatives

Le présent document comporte par référence des dispositions d'autres publications. Les références réglementaires et normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après :

- NF P 18-357 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Coulis courants d'injection pour précontrainte - Fabrication,
- NF P 18-358 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Coulis courants d'injection pour précontrainte - Mesure de la fluidité et de la réduction d'eau,
- circulaire n° 99-54 du 20 août 1999 instituant un avis technique des coulis d'injection pour conduits de précontrainte.

### 3. Principes physiques mis en jeu

Un coulis de ciment contient toujours une fraction d'air en proportion d'environ 1 %. Cet air occlus peut rester en place après injection ou bien remonter vers les points hauts, en fonction de la taille des bulles, de la viscosité et du seuil éventuel du coulis. La vitesse de remontée d'une bulle d'air dans un coulis purement visqueux est proportionnelle au carré de son diamètre et inversement proportionnelle à la viscosité du coulis. Seul un coulis à seuil peut bloquer cette ascension. En général, un coulis dont les caractéristiques évoluent rapidement au repos, c'est-à-dire un coulis à comportement thixotrope, résout ce problème.

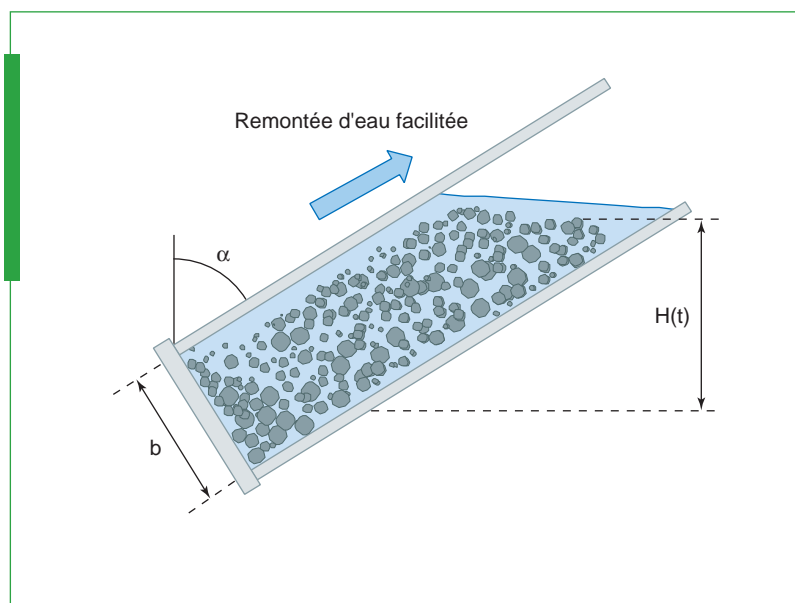
Le ressuage a pour origine les forces de gravité qui s'exercent sur les grains solides. Ces forces peuvent conduire, selon les propriétés rhéologiques du coulis, à de la sédimentation ou de la consolidation [LER 06], ce qui se traduit par l'apparition, en partie haute des tubes d'essai, d'eau claire ou trouble, voire de pâte blanchâtre constituée de portlandite et d'ettringite. Cependant, un coulis peut rester homogène dans une éprouvette verticale mais produire un ressuage important dans une gaine de précontrainte. Deux causes identifiées sont à l'origine de cette observation : l'effet Boycott et l'effet de filtration. L'essai présenté dans la présente méthode permet d'évaluer la capacité du coulis à s'opposer à ces deux phénomènes majeurs.

#### *Effet Boycott*

L'effet Boycott a été découvert en 1920 à propos de la sédimentation du sang. Lorsque le tube à essai est incliné, les particules solides, qui sédimentent verticalement, rencontrent la génératrice inférieure du tube incliné (Fig. 1). Dans le même temps, une zone d'eau apparaît sur la génératrice supérieure. Cette zone forme un canal qui facilite la remontée du liquide. Le phénomène se caractérise par une augmentation de la vitesse de progression du front des particules.

L'effet Boycott est augmenté pour des tubes longs et étroits. L'angle donnant la vitesse maximum est théoriquement proche de  $45^\circ$ , ce qui a été confirmé par des essais sur coulis [LER 00]. Cet effet est retrouvé dans les coulis de ciment qui sont sujets à la sédimentation. Le signe extérieur caractéristique sur tube transparent est la formation de canaux dans les lignes de plus grande pente du tube, canaux qui rejoignent la génératrice supérieure du tube et enfin la zone de ressuage supérieure (Fig. 2).

*Figure 1*  
*Schématisation*  
*de l'effet Boycott*  
*pour les coulis de ciment.*





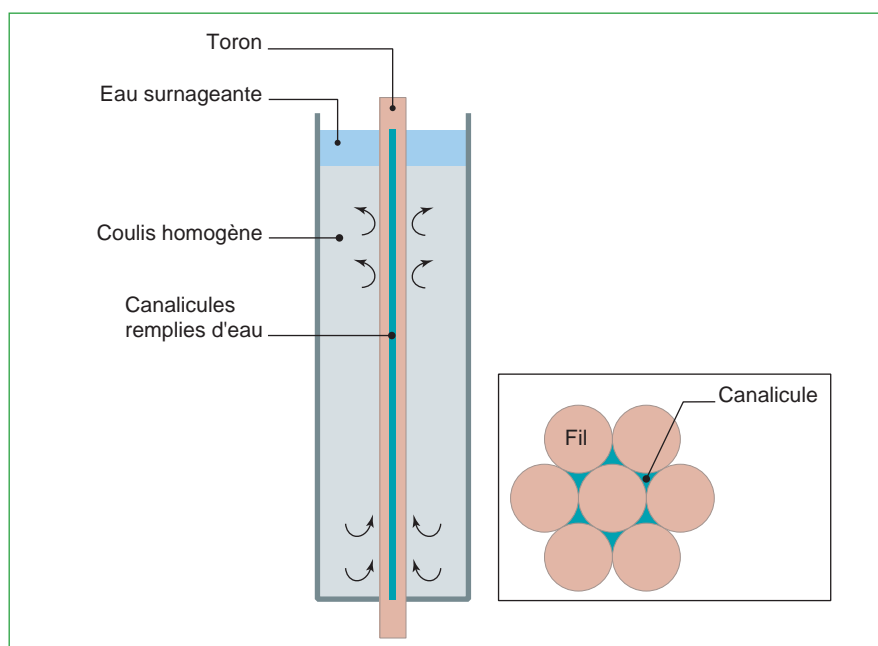
**Figure 2**

*Manifestation de l'effet Boycott sur un tube incliné dans lequel a été injecté un coulis de ciment.*

### *Effet de filtration*

L'effet de filtration se manifeste dans le cas d'utilisation de torons clairs. Il provient de l'effet de filtre qu'exercent les torons en permettant à l'eau du coulis, mais pas aux grains de ciment, d'atteindre les canalicules situés entre les fils. Le mécanisme met en jeu un transport d'eau par les canalicules. L'eau circule à cause de l'existence d'un gradient de pression. En effet, la pression dans le coulis est proportionnelle à la masse volumique du coulis, tandis qu'à une même altitude, celle dans les canalicules est la pression hydrostatique (canalicules remplis d'eau). La masse volumique du coulis étant au moins deux fois plus élevée que celle de l'eau, la différence de pression entre l'extérieur et « l'intérieur » du toron constitue le moteur du phénomène.

Parmi les sources possibles d'instabilité, le phénomène de filtration est le plus critique pour les coulis de ciment. Quantitativement, il peut augmenter le ressuage d'un facteur 5, voire plus [LER 06].



**Figure 3**

*Principe physique de la filtration par un toron.*

## 4. Appareillage (Fig. 4)

L'appareillage est constitué des matériels suivants :

- un tube transparent en PVC de  $1 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m}$  de longueur et de diamètre intérieur  $81 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ,
- deux plaques circulaires transparentes PVC de diamètre 90 mm. L'une des deux plaques est percée de deux trous de diamètre  $17 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ,
- colle pour le collage du PVC,
- un jeu de douze torons T 15,7 de longueur  $98 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$  liés entre eux par un fil de fer à trois niveaux équidistants,
- deux bouchons coniques en caoutchouc ou équivalent, permettant l'obturation des orifices de la plaque supérieure,
- un cône de Marsh pour l'essai de fluidité selon la norme NF EN 445 ou P18 358,
- un tube plongeur souple de longueur 1,20 m et de diamètre extérieur inférieur aux trous de perçage de la plaque supérieure et de diamètre intérieur au moins égal à 12 mm,
- un entonnoir pouvant être relié au tube plongeur,
- une éprouvette transparente de 100 ml graduée en millilitre,
- un bâti permettant de supporter le tube de 1 mètre avec une inclinaison de  $30^\circ \pm 2^\circ$  par rapport à l'horizontale,
- un malaxeur à coulis. Dans le cas d'un essai de convenance, le malaxeur doit être celui prévu pour le chantier,
- un appareil photo,
- un thermomètre.

## 5. Confection de l'éprouvette

Les étapes suivantes permettent la réalisation de l'éprouvette d'essai :

- collage du disque à l'extrémité inférieure du tube ;
- après durcissement de la colle, introduction du jeu de douze torons ligaturés et du tube plongeur, puis collage de la plaque supérieure. Lors du collage de la plaque supérieure, s'assurer qu'un des deux trous se situe en périphérie du tube PVC.

## 6. Fabrication du coulis

Avant la fabrication, la température extérieure ainsi que celle des matériaux sont notées. Le coulis est ensuite préparé en respectant la formulation et la méthode de fabrication proposée dans le dossier d'avis technique, conformément à la norme P 18 357. À la fin du malaxage, la température du coulis est notée et un échantillon de coulis est prélevé pour la mesure de fluidité. Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un cône de Marsh selon la norme NF P 18 358. Dans le cas d'un coulis à caractère thixotrope, on mesure le seuil de cisaillement en appliquant le mode opératoire de l'annexe 3.2 de la circulaire n° 99-54 du 20 août 1999 instituant un avis technique des coulis d'injection pour conduits de précontrainte.

## 7. Remplissage du tube d'un mètre

Le tube, maintenu verticalement, est rempli par gravité du bas vers le haut par l'intermédiaire d'un entonnoir relié au tube plongeur. L'embout du tube plongeur est remonté progressivement, tout en restant en-dessous du front de coulis. Le remplissage est effectué jusqu'à évacuation par le second orifice de la plaque du trop plein et des bulles concentrées à la surface en fin d'opération. Une purge du tube est effectuée en laissant échapper une quantité comprise entre un demi-litre et un litre de coulis. Dès la fin de la purge, l'étanchéité du tube est assurée par l'application des bouchons. Enfin, on positionne l'éprouvette sur le bâti selon une inclinaison de  $30^\circ \pm 2^\circ$  (Fig. 4 et Fig. 5). Le positionnement du tube d'un mètre est effectué de telle sorte qu'un des deux trous se situe en position haute. Cette disposition facilite en effet l'évacuation ultérieure de l'eau exsudée éventuelle.



Figure 4

Tubes d'un mètre inclinés à  $30^\circ$ .

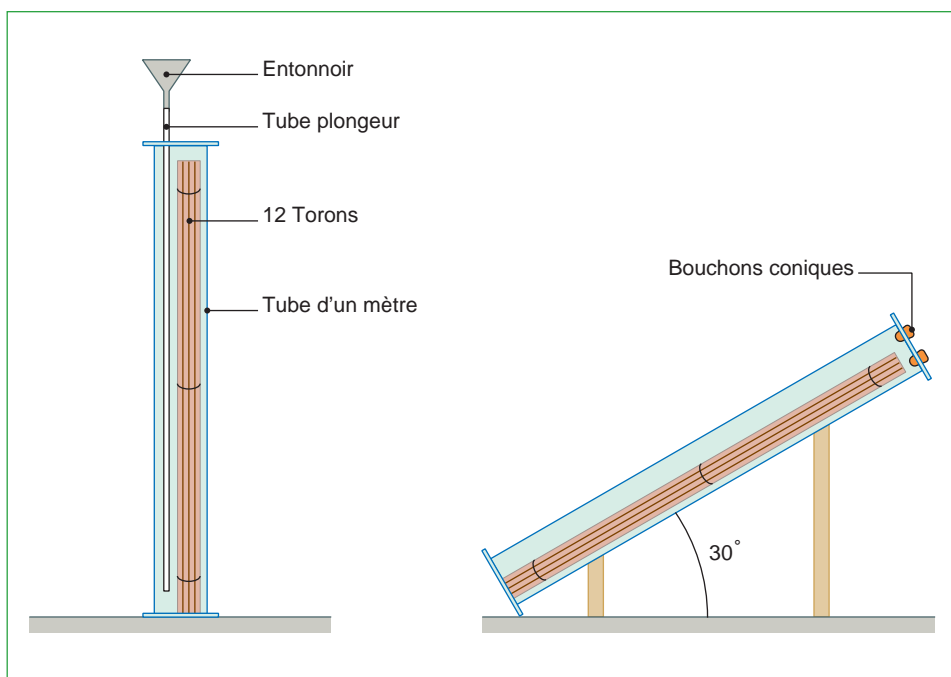


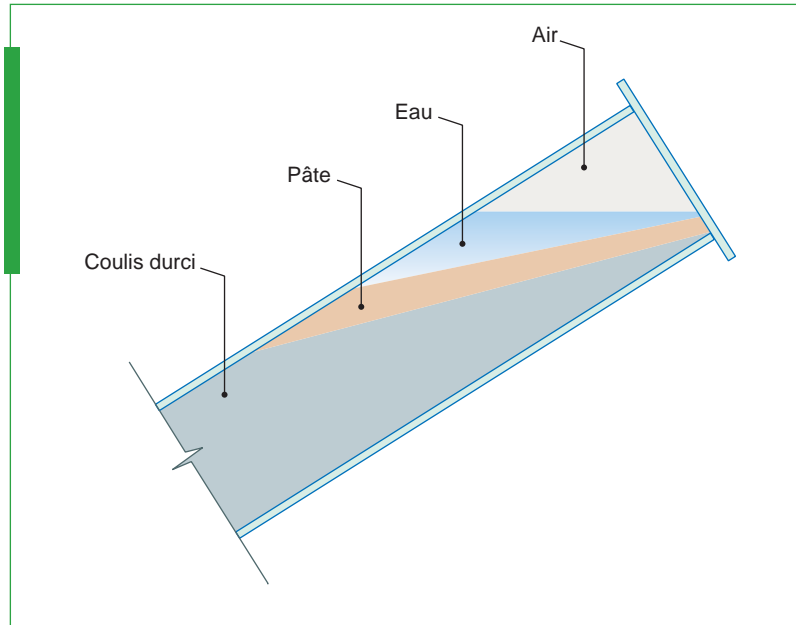
Figure 5

Équipement du tube d'un mètre.

## 8. Mesure des volumes (Fig. 6)

À une échéance de 24 heures, une photo de l'extrémité supérieure du tube est prise (Fig. 7). Le tube est ensuite remis en position verticale pour permettre la détermination des différents volumes.

*Figure 6*  
*Vue de la partie supérieure*  
*du tube d'un mètre après*  
*durcissement du coulis.*



*Figure 7*  
*Gros plan*  
*sur l'extrémité du tube.*



### Mesure du volume d'air ( $V_a$ )

Les bouchons sont déposés. Remplir une éprouvette graduée de 100 ml d'eau. À l'aide de cette éprouvette, compléter le remplissage du tube et lire le volume d'eau restant dans l'éprouvette graduée ( $V_1$ ). Le volume d'air  $V_a$  est égal à  $100 - V_1$  en ml.

### Mesure du volume d'eau exsudée ( $V_e$ )

Le couvercle supérieur est déposé et le tube d'un mètre est vidé de son liquide. Remplir une éprouvette graduée de 100 ml d'eau. À l'aide de cette éprouvette, compléter le remplissage du tube et lire le volume d'eau restant dans l'éprouvette graduée ( $V_2$ ). Le volume d'eau introduit  $V_{et}$  est égal à  $100 - V_2$  en ml. La différence entre le volume  $V_{et}$  et le volume d'air  $V_a$  donne le volume d'eau exsudée  $V_e$  en ml.

$$V_e = V_{et} - V_a$$

### Mesure du volume de pâte ( $V_p$ )

La vidange complète du liquide contenu dans l'éprouvette est effectuée. Les parties non saines de coulis sont purgées soit par un jet d'eau soit par des moyens mécaniques si nécessaire. Remplir une éprouvette graduée de 100 ml d'eau. À l'aide de cette éprouvette, compléter le remplissage du tube et lire le volume d'eau restant dans l'éprouvette graduée  $V_3$ . Le volume d'eau ajouté  $V_{tot}$  est égal à  $100 - V_3$  en ml. La différence entre le volume  $V_{tot}$  et le volume  $V_{et}$  donne le volume de pâte  $V_p$  en ml.

$$V_p = V_{tot} - V_{et}$$

Les différents volumes  $V_a$ ,  $V_e$  et  $V_p$  sont ensuite rapportés au volume théorique de coulis  $V_c$  introduit dans le tube. Le volume théorique de coulis  $V_c$  est égal au volume théorique du tube auquel est retranché le volume théorique des douze torons. À titre d'information, le volume théorique de coulis est fourni dans le tableau I suivant pour la géométrie courante. On exprimera les rapports  $V_a/V_c$ ,  $V_e/V_c$  et  $V_p/V_c$  en pourcentage [%].

**Tableau I - Grandeurs utiles**

Nombre de torons	12
Diamètre tube (mm)	81
Section tube (mm <sup>2</sup> )	5153
Section torons (mm <sup>2</sup> )	1800
Rapport Section torons sur Section tube	0,35
$V_c$ (cm <sup>3</sup> )	3353

## 9. Expression des résultats

Le compte-rendu d'essai doit comporter les éléments suivants :

- description du dispositif d'essai ;
- formulation du coulis testé avec origine et caractéristique des constituants (eau, ciment, adjuvant éventuel, etc.) ;
- méthode de fabrication du coulis ;

- température ambiante et température des matériaux et du coulis ;
- évolution de la température ambiante pendant toute la durée de l'essai ;
- mesure de la fluidité initiale ou du seuil de cisaillement ;
- mesure des volumes d'air ( $V_a$ ), d'eau ( $V_e$ ), et éventuellement de pâte ( $V_p$ ) à 24 h exprimés en ml ;
- pourcentages de ces volumes par rapport au volume théorique de coulis dans le tube exprimés en pourcentage avec deux chiffres après la virgule ;
- photos de la partie haute du tube ;
- observations et commentaires sur la formation de pâte ou liquide au sommet du tube et sur les difficultés rencontrées lors de l'essai ;
- observations et commentaires sur la fissuration éventuelle du coulis avec indication sur la position, l'orientation et l'ouverture des fissures.

## 10. Répétabilité de la mesure

Des essais de répétabilité ont été réalisés dans deux laboratoires sur deux coulis différents.

Les valeurs obtenues sont :

		Laboratoire 1	Laboratoire 2
Nombre d'essais		6	5
Pourcentage volume d'eau	Valeur moyenne	1,23	4,66
	Écart type	0,39	0,45
Pourcentage volume d'air	Valeur moyenne	1,68	1,69
	Écart type	0,25	0,15

## 11. Bibliographie

[LER 00] LE ROY R. , WILLAERT M., ROUANET D., MIRMAND H., Les coulis d'injection pour gaines de précontrainte - identification des paramètres favorisant la formation de poches d'air et d'eau, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 229, nov.-déc., 2000, pp. 53-70.

[LER 06] LE ROY R., Rhéologie et stabilité des matrices cimentaires et des coulis - Application à l'amélioration de la durabilité de la précontrainte, *Études et Recherches des LPC*, OA 53, LCPC, Paris, 2006, 80 pages.

<b>Document publié par le LCPC</b>	sous le numéro C1502486
<b>Conception et réalisation</b>	LCPC-DISTC, Marie-Christine Pautré
<b>Dessins</b>	LCPC-DISTC, Philippe Caquelard
<b>Impression</b>	JOUVE
<b>Dépôt légal</b>	2e trimestre 2007



Cet essai a pour objet de mesurer les quantités d'eau ressuée, de pâte et d'air qui, après injection, peuvent être observées à la surface du coulis au repos. Il répond aux mêmes objectifs que l'essai au tube incliné de 5 m.

Il prend en compte l'effet de filtration et l'effet Boycott. Le premier phénomène est dû à la pénétration de l'eau dans les petits canalicules entre torons. Il est lié à un gradient de pression et entraîne une remontée d'eau vers le sommet du conduit.

Le second phénomène, appelé effet Boycott, est lié à la mise en oeuvre dans un tube incliné qui engendre une zone qui facilite la remontée d'eau vers le sommet du conduit.

L'essai consiste à remplir par gravité un tube incliné d'un mètre contenant 12 torons. Le conduit est ensuite scellé et laissé au repos pendant 24 heures. Les volumes d'eau ressuée, de pâte et d'air accumulés à la surface du coulis sont alors mesurés.

Cet essai peut être utilisé en laboratoire, dans le cadre de la mise au point d'une formule de coulis, ou sur chantier, dans le cadre des épreuves de convenance avant le démarrage des injections sur l'ouvrage.

This test serves to quantify water bleeding, paste and air void rise which can be observed after setting time of the grout. This test has the same objectives than the five-meter inclined tube test.

It takes into account the filtering and the Boycott's effects. The first is due to the fact that the water can enter inside the small spaces between the strand wires. The phenomenon creates a pressure gradient and then the rise of water at the top part of the tube.

The second phenomenon, called Boycott's effect, is due to the fact that the settlement in an inclined tube creates a zone where the water can easily rise towards the top part of the duct.

The test consists in filling by gravity an inclined transparent duct containing 12 strands. Then the duct is sealed and left at rest for 24 hours. The volumes of bleeding water, paste, and air accumulated on the surface of the grout are then measured.

The test is usable either in laboratory, within the framework of grout mix design, or on job site, for quality control.