



NOTE D'INFORMATION

OUVRAGES
D'ART

21

Auteurs : SETRA/CTOA
LCPC/DTOA

Éditeur



COULIS POUR INJECTION DE CONDUITS DE PRÉCONTRAÎNTE

Juillet 1996

Les coulis d'injection ont un rôle très important pour la durabilité des ouvrages en béton précontraint. Des anomalies concernant le remplissage des conduits de précontrainte ont été détectées récemment sur plusieurs ouvrages : présence d'air, d'eau et de produits suspects en partie haute des câbles.

Cette note d'information fait état des connaissances actuelles sur ce phénomène. Elle donne également quelques enseignements pour la conception et l'exécution des ouvrages. Elle introduit notamment un essai de stabilité sur tube incliné permettant de qualifier la formulation du coulis, la méthode de fabrication et la méthode d'injection.

1 - INTRODUCTION

Les coulis adjuvantés sont actuellement largement utilisés en raison des intérêts qu'ils présentent pour l'exécution des ouvrages, principalement une bonne fluidité et une maîtrise de la durée d'injectabilité.

Récemment, des observations effectuées sur plusieurs ouvrages ont montré des défauts de remplissage des conduits et la présence en partie haute d'un produit ayant la consistance d'une pâte humide et molle surmonté d'une couche d'eau et d'une poche d'air. Ces observations ont été faites tant sur des ouvrages importants que sur des ouvrages courants du type pont dalle en béton précontraint. Ce phénomène a été retrouvé au cours d'essais d'injection réalisés dans des tubes translucides de 5 mètres de longueur inclinés à 30 degrés.

Même en l'absence de pénétration d'agents extérieurs agressifs et même si l'eau de ressuage est fortement basique, on peut craindre une oxydation des aciers de précontrainte lorsqu'ils traversent l'interface eau-air compte tenu des phénomènes de condensation consécutifs aux variations de température (à cet égard les câbles extérieurs au béton sont probablement plus exposés que les câbles intérieurs).

A partir des expertises menées par le L.C.P.C. et le C.E.B.T.P. il est aujourd'hui nécessaire de faire le point sur l'état des connaissances et de tirer quelques enseignements pour la conception des ouvrages et leur exécution. Cette note est également l'occasion de faire état du projet d'agrément des coulis par la Commission Interministérielle de la Précontrainte.

2 - ÉTAT DES CONNAISSANCES

La directive provisoire LCPC-SETRA de mars 1973 sur l'injection des gaines des ouvrages en béton précontraint, qui a été accompagnée par la mise au point de formules régionales de coulis et la mise en oeuvre d'une politique de contrôle par gammagraphie du remplissage des conduits de précontrainte, a permis de résoudre les problèmes d'injection les plus importants qui avaient été découverts entre 1970 et 1973. A partir de 1978, le changement introduit dans la normalisation des ciments a conduit à un abandon progressif des formules régionales de coulis, et à partir du début des années 1980 les contrôles de remplissage des conduits par gammagraphie ont fortement diminué jusqu'à ne plus être effectués que de façon épisodique dans la mesure où l'on estimait avoir une bonne maîtrise des différentes opérations d'injection.

Pendant ces vingt dernières années, une évolution s'est faite avec l'utilisation de coulis de plus en plus fluides pour faciliter l'injection des conduits de précontrainte. La recherche d'une plus grande fluidité s'est accompagnée, à partir des années 80, d'une utilisation généralisée de superplastifiants. Cette évolution dans la formulation des coulis et dans les méthodes d'injection s'est imposée sans cependant que l'on s'assure régulièrement du remplissage effectif des conduits.

C'est en 1994, à l'occasion d'une campagne d'auscultation par gammagraphie des câbles de précontrainte extérieure d'un pont-caisson récemment construit, que des anomalies ont été détectées au point haut des conduits extérieurs qui avaient été injectés avec un coulis de ciment adjuvanté. Des observations réalisées après ouverture de quelques conduits ont mis en évidence un manque de remplissage et la présence d'un produit ayant la consistance d'une pâte humide et molle qui durcissait par la suite à l'air. Des contrôles réalisés en 1995 sur d'autres ouvrages en construction ont permis de constater que ce phénomène existait aussi dans des ponts courants comme les ponts-dalle et qu'il était plus répandu qu'on ne pouvait le penser de prime abord.

Ces anomalies ont pu être reproduites lors d'essais d'injection de coulis adjuvanté réalisés en laboratoire dans des tubes transparents

inclinés. Lorsque certaines conditions sont réunies, l'emploi d'un superplastifiant favorise la migration d'espèces minérales qui se forment pendant la prise du coulis. Il se produit une séparation par densité entre la suspension de ciment en cours d'hydratation et ces espèces minérales plus légères (en particulier l'ettringite et la portlandite). Il se crée ainsi un produit blanchâtre dont la migration qui se produit tout le long du tube s'accompagne d'une remontée de bulles d'air. A la fin de l'essai, il se forme en partie supérieure du tube une couche de pâte blanchâtre surmontée d'un liquide de couleur plus ou moins jaunâtre, lui-même surmonté d'un espace rempli d'air (photo 1).



Photo 1 - Visualisation de la poche d'air en partie haute du tube d'essais 10 minutes après l'injection

Bien que le mécanisme de formation de ces produits ne soit pas à l'heure actuelle complètement élucidé, les analyses effectuées tendent à montrer qu'il s'agit d'un phénomène de ressuage conjugué à un tassement du coulis, et que ce phénomène est amplifié par la présence du superplastifiant, cet adjuvant pouvant présenter dans certains cas une incompatibilité avec le ciment. L'inadéquation du couple ciment-adjuvant provoque alors une instabilité du coulis pendant la phase dormante de la prise.

La coexistence d'une poche d'air et d'une phase liquide au sein d'un conduit de précontrainte peut poser à long terme un problème de pérennité de la précontrainte. En effet, bien que le milieu soit confiné et que le pH du

liquide soit très élevé, l'air est toujours saturé en eau et de la condensation peut se produire sur les parties des aciers de précontrainte exposées à cet air très humide ; les conditions sont alors réunies pour qu'une corrosion des aciers puisse se développer préférentiellement à l'interface eau-air.

3 - ESSAIS DE STABILITÉ SUR TUBE INCLINÉ

3.1. Objet

L'objet de cet essai est de caractériser en vraie grandeur l'exsudation et la stabilité du coulis proposé pour injecter les conduits de précontrainte en tenant compte de l'effet de filtre dû à la présence des torons. Il permet également de vérifier la validité des méthodes de fabrication et d'injection (en particulier le délai proposé entre la fin de la première injection et le début de la reprise d'injection). L'objectif est de s'assurer qu'on aura un remplissage complet des conduits de précontrainte et une protection durable des câbles de précontrainte mis en oeuvre dans les ouvrages d'art.

3.2. Principe

L'essai consiste, dans une première phase, à mesurer la quantité d'eau ressuée et la quantité d'air accumulée à la surface d'un coulis de liant hydraulique injecté sous pression dans un conduit transparent et laissé au repos et à l'abri de toute évaporation, puis dans une seconde phase à procéder à une réinjection du coulis et à mesurer une nouvelle fois les quantités d'eau et d'air.

3.3. Appareillage

- 2 tubes en PVC transparent de diamètre intérieur $81 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ et de longueur 5 m, munis de bouchons à chaque extrémité avec vanne d'arrêt à la partie inférieure et vis de purge à la partie supérieure. Ces tubes, qui doivent résister à une pression intérieure

d'au moins 1 Mpa, sont posés sur des supports de façon à avoir une inclinaison de $30^\circ \pm 2^\circ$ (l'inclinaison correspond à une dénivellation de hauteur 2,50 m) :

- 24 torons de précontrainte ;
- le matériel de malaxage et le dispositif d'injection (avec manomètre de contrôle de pression) prévus dans la méthode de fabrication ;
- 1 thermomètre enregistreur.

3.4. Processus opératoire

Les deux tubes transparents sont fixés sur leurs supports de façon à ce qu'ils ne présentent pas de flèche notable, et qu'ils soient inclinés de $30^\circ \pm 2^\circ$ par rapport à l'horizontale. Douze torons sont enfilés dans chacun des tubes. Les bouchons sont ensuite fixés (par collage) sur les tubes pour obturer les extrémités.

Le coulis à tester est préparé en respectant la formulation et la méthode de fabrication proposées (cf. § 5.1 et 5.2). A la fin du malaxage, un échantillon de coulis est prélevé afin de vérifier que la fluidité prescrite est bien atteinte. 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 thixotropé on peut utiliser le mode opératoire E.D.F. référencé "EDF CE 88-148 Mortiers et coulis thixotropés - Mesure de la cohésion" (mesure de la viscosité avec un scissomètre).

Injection du premier tube

Le coulis est injecté à la partie basse du premier tube (tube 1) après ouverture de la vis de purge. Quand le coulis sort à la partie supérieure du tube, avec la même consistance qu'à l'entrée, la vis de purge est fermée et la pression d'injection est maintenue pendant la durée prévue par la méthode d'injection. Le robinet situé en partie inférieure est alors fermé et l'opération d'injection est considérée comme terminée.

Les hauteurs d'air, d'eau et éventuellement de substance liquide surnageant au dessus du coulis de ciment à la partie supérieure du tube

sont mesurées (fig.1). Cette substance liquide éventuellement formée se distingue du coulis de ciment proprement dit par une couleur blanchâtre ou jaunâtre, généralement plus claire que celle du coulis. Les mesures de hauteurs sont effectuées à des échéances comprises entre 0 heure et 24 heures après la fin de l'injection, l'une des échéances devant coïncider avec le moment de la reprise d'injection du deuxième tube. A titre indicatif, les mesures peuvent être faites à 30 minutes, 1 heure, 2 heures et 24 heures après la fin de l'injection.

Injection du second tube

Un processus d'injection identique à celui utilisé pour injecter le tube 1 est employé pour injecter le second tube (tube 2), les deux tubes étant injectés de façon quasi-simultanée. Au bout d'une période de temps définie et comptée à partir de la fin de la première injection, le malaxage du coulis restant dans la cuve du malaxeur est repris. Une nouvelle mesure de la fluidité du coulis est effectuée.

La vis de purge et le robinet du tube 2 sont réouverts, et une reprise d'injection a lieu. Cette dernière permet d'évacuer les substances liquides qui ont pu s'accumuler en partie haute du tube et de remplir le tube 2 par du coulis de la manière la plus complète possible. Quand le coulis sort à la partie supérieure du tube, la vis de purge est fermée et la pression de réinjection est maintenue pendant la durée prescrite. Le robinet situé en partie inférieure est alors fermé et l'opération de reprise d'injection est considérée comme achevée.

La durée entre la première injection et la reprise d'injection (usuellement comprise entre 30 minutes et 2 heures) et le temps de remalaxage sont définis par la méthode d'injection à valider.

Comme pour le tube 1, les mesures de hauteurs sont effectuées à des échéances comprises entre 0 heure et 24 heures après la fin de la première injection ; en particulier, elles ont lieu juste avant la reprise d'injection, puis 30 minutes, 1 heure et 2 heures après la fin de la reprise d'injection.

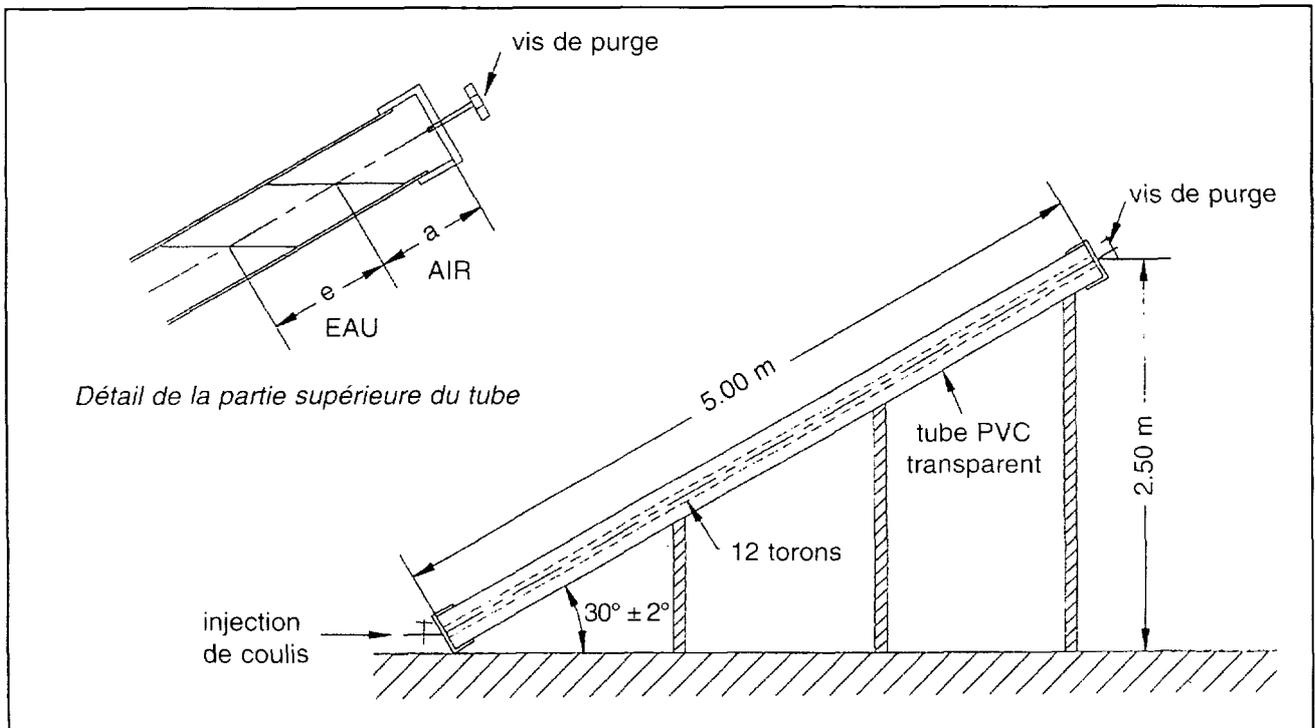


Figure 1 : Dispositif d'essai de stabilité sur tube incliné et mesure des hauteurs d'eau et d'air

3.5. Expression des résultats

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

- la description du dispositif d'essai ;
- la formulation du coulis testé (eau, ciment, adjuvants éventuels...) ;
- la méthode de fabrication du coulis ;
- les résultats de mesure de fluidité du coulis injecté dans les tubes ;
- la méthode d'injection suivie (pression, durée, délai de réinjection ...) ;
- les mesures de hauteur d'air, d'eau et d'éventuelles substances liquides surnageantes, ainsi que toutes observations et constatations en relation avec la formation de produits d'exsudations ou avec des difficultés apparues pendant l'essai ;
- l'évolution des températures pendant toute la durée de l'essai ;
- des photos illustrant l'installation d'essai et la partie haute des tubes.

4 - CONSÉQUENCES SUR LA CONCEPTION DES OUVRAGES

Les constatations évoquées précédemment arrivent à point nommé pour rappeler à l'ingénieur que l'acier de précontrainte, comme tout autre matériau, n'est pas éternel. Ceci n'a rien d'alarmant si l'affaiblissement progressif de la structure s'accompagne, à partir d'un certain seuil, de signes avant-coureurs facilement observables au cours d'une visite et si l'ouvrage conserve alors une marge de sécurité suffisante ménageant le temps nécessaire à la réalisation d'investigations complémentaires, à la mise au point d'un projet de réparation et à l'exécution des travaux correspondants.

Cet objectif de maintien d'une ductilité minimale peut impliquer la mise en place, dans certaines zones, d'un ferrailage passif spécifique.

La partie 2 de l'Eurocode 2, propose des règles de dimensionnement en ce sens. Elles ne sont malheureusement pas satisfaisantes. La réflexion engagée à l'occasion de l'élabo-

ration du DAN (document d'application nationale) devrait permettre de les améliorer substantiellement.

Il n'est pas inutile, dès maintenant, de rappeler quelques idées simples :

- pour améliorer la longévité de la précontrainte : par une conception de détail soignée, il convient d'éviter tout ruissellement, coulure, infiltration ou retenue d'eau dans les zones d'ancrage ou de passage de gaine.
- pour faciliter la mise en œuvre d'un renforcement actif : il importe, chaque fois que la structure s'y prête, de prévoir des points d'ancrage et de déviation pour des câbles additionnels extérieurs, en s'assurant que l'on dispose d'une réserve de compression suffisante pour absorber la précontrainte correspondante compte tenu de la très grosse incertitude sur la valeur résiduelle de la précontrainte d'origine dans certaines zones.
- pour faciliter le remplissage correct des conduits : mise en place d'évents de part et d'autre des points hauts... se reporter à l'article 65 de l'additif au fascicule 65 A.

5 - CONSÉQUENCES SUR L'EXÉCUTION DES OUVRAGES

Il est clair que le maître d'œuvre doit veiller au respect des clauses du fascicule 65-A et de son additif, tant en ce qui concerne le coulis proprement dit que sa mise en œuvre, et l'assurance de la qualité. Les éléments ci-dessous précisent ou complètent toutefois le fascicule 65-A, certains d'entre eux conduisant à des exigences à introduire dans les pièces du marché.

Le P.A.Q doit traiter de l'ensemble des points influant sur la qualité de l'injection : la formulation du coulis, la méthode de fabrication, la méthode d'injection. Il doit également désigner la personne responsable de l'ensemble des opérations d'injection. Le maître d'œuvre doit s'assurer de la qualité de l'ensemble, l'insuffisance d'un de ces éléments pouvant conduire à une mauvaise protection des armatures. Il doit

également disposer suffisamment tôt de la proposition de l'entrepreneur afin de pouvoir consulter éventuellement le réseau technique.

5.1. Formulation du coulis

La formulation du coulis définit les différents constituants avec mention des tolérances sur les dosages. Le ciment doit être un CPA-CEM I, un CPJ-CEM II/A-L ou un CPJ-CEM II/A-D limité à 8 % de fumée de silice. Il doit être admis à la marque "NF - Liants hydrauliques" et ne doit pas comporter plus de 3 % de constituants secondaires. Seul l'additif agent de mouture est autorisé, dans une proportion inférieure à 0,1 %.

Bien que le fascicule 65-A prescrive que les adjuvants utilisés doivent être inscrits à la marque "NF Adjuvants" dans la catégorie "adjuvants pour coulis d'injection", il n'existe pas actuellement d'adjuvants inscrits à cette marque. A défaut, il est recommandé de n'utiliser que des adjuvants inscrits à la marque NF- adjuvants (pour béton), l'inscription à cette marque donnant des garanties sur la composition de l'adjuvant mais également sur le contrôle de qualité. Toutefois on tiendra compte des spécifications complémentaires suivantes :

- les adjuvants contenant des thiocyanates, des nitrites, des nitrates, des formiates et des sulfures sont exclus ;
- la teneur en chlorures (Cl^-) est limitée à 0,10 % de la masse des adjuvants en poudre et à 100 mg/l pour les adjuvants liquides ;
- la teneur en sulfates (SO_4^{--}) est limitée à 2 % de la masse des adjuvants en poudre et à 2g/l pour les adjuvants liquides.

Le P.A.Q. doit préciser les mesures prises par l'entrepreneur pour garantir la conformité des constituants du coulis.

Les exigences ci-dessus sont des conditions nécessaires mais non suffisantes pour formuler un coulis. En particulier, il convient de s'assurer de la compatibilité des produits entre-eux, celle-ci étant jugée au travers des épreuves d'étude.

5.2. Méthode de fabrication du coulis

La méthode de fabrication doit préciser :

- le type de matériel utilisé ;
- l'ordre d'introduction des constituants ;
- le temps de malaxage, décomposé en fonction de l'ordre d'introduction des différents constituants ;
- le temps de remalaxage.

Un défaut de malaxage peut conduire à une hétérogénéité du coulis, on doit donc veiller au respect du temps de malaxage sur le chantier.

5.3. Méthode d'injection du coulis

La méthode d'injection doit définir :

- le type de matériel utilisé ;
- la pression d'injection du coulis ;
- la durée de maintien sous pression après la fin d'injection et la valeur de la pression correspondante ;
- la reprise d'injection (durée entre la fin de la première injection et la reprise).

La reprise d'injection doit être imposée car elle permet de limiter fortement le risque de présence de vide et/ou d'eau dans le conduit. Elle doit être faite au minimum une demi-heure après la fin de la première injection.

La méthode d'injection sous vide ne présente pas d'intérêt particulier vis-à-vis du problème posé car elle n'évite pas le ressuage et le tassement du coulis après injection.

5.4. Épreuve d'étude du coulis

L'article 92.3.3 du fascicule 65-A indique qu'une "épreuve d'étude est effectuée, à moins que l'entrepreneur ne propose une formule ayant fait l'objet d'une étude précédente à l'occasion d'un ouvrage à injecter dans des conditions similaires".

On doit comprendre ici que la formulation, les méthodes de fabrication et d'injection doivent être identiques. Par ailleurs le type de câblage doit être semblable : tracé (importance des

déviations et des dénivelées) et longueur des câbles en particulier. Il convient également que l'entreprise fournisse dans son P.A.Q., l'ensemble des éléments de l'épreuve d'étude pour l'ouvrage faisant référence.

Un essai de stabilité sur tube incliné peut être réalisé au cours de l'épreuve d'étude du coulis.

5.5. Épreuve de convenance

En complément au fascicule 65-A, pour les ouvrages importants ou pour un lot conséquent d'ouvrages courants (à titre indicatif plus de cinq ouvrages), l'essai de stabilité sur tube incliné doit être considéré comme obligatoire. Le C.C.T.P. doit alors indiquer cette obligation ainsi que les spécifications requises : quasi absence d'air, d'eau, ou de produit quelconque après prise du coulis. Dans le cas d'un chantier de longue durée, notamment si la formulation du coulis évolue ou si les conditions de température sont notablement différentes, il pourra être nécessaire de procéder à un nouvel essai.

Dans les autres cas on peut se dispenser de réaliser l'essai sur tube incliné sous réserve que le coulis proposé ait fait l'objet d'un tel essai sur un chantier récent. Les documents concernant l'essai réalisé (cf. 3.5 en particulier) devront alors être fournis par l'entreprise et joints au P.A.Q..

5.6. Rôle du chargé de la mise en œuvre de la précontrainte (C.M.P.)

En application de l'article 95.1 du fascicule 65-A, le contrôle et la direction des injections ne relèvent pas obligatoirement du C.M.P.. L'injection faisant partie intégrante de la technologie de la précontrainte et affectant directement la pérennité de l'effort de précontrainte dans l'ouvrage, il nous semble nécessaire d'exiger qu'elle soit supervisée par le C.M.P..

On rappelle que le maître d'œuvre peut vérifier auprès du secrétariat de la Commission Interministérielle de la Précontrainte l'agrément du C.M.P. par le distributeur du procédé.

5.7. Contrôle extérieur

La situation présente impose une vigilance accrue du contrôle extérieur à qui il revient de s'assurer :

- de l'identification et de la conformité des constituants utilisés,
- du caractère concluant des essais de convenance,
- du respect des procédures de fabrication (dosages, ordre d'introduction des constituants, temps de malaxage ...) et d'injection.

A posteriori, il convient d'examiner attentivement le remplissage des événements (avant et après recépage) et des capots provisoires d'injection (lorsqu'il en est utilisé) au moment de leur démontage : les vides en partie haute, s'ils s'accompagnent d'une absence de coulis entre les brins d'une clavette sont caractéristiques d'une injection imparfaite. Les câbles extérieurs peuvent également être auscultés à la massette : les tronçons mal remplis sonnent creux.

Enfin, il est conseillé de prévoir au marché des contrôles gammagraphiques : l'emplacement des clichés sera utilement guidé par l'ensemble des constatations précédemment effectuées.

6 - AGRÉMENT DES COULIS

La Commission Interministérielle de la Précontrainte a entrepris l'élaboration d'un règlement qui permettra de délivrer des agréments de coulis. Cette procédure d'agrément permettra de garantir à l'utilisateur que le coulis employé présente les caractéristiques requises et que le titulaire de l'agrément assure un contrôle de production et de conformité. Dans un premier temps, les coulis bénéficieront d'une autorisation de fourniture.

L'utilisation d'un coulis agréé permettra de s'affranchir de l'épreuve d'étude. Les essais de fluidité et d'exsudation prévus au titre d'essais de convenance par le fascicule 65-A resteront bien entendus nécessaires.

Cette note a été rédigée par :

R. CHAUSSIN - Direction Technique des Ouvrages d'Art
B. GODART - Division Fonctionnement et Durabilité des Ouvrages d'Art
LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)
58, boulevard Lefèbvre
75732 Paris Cedex 15 - France

J. LEFEVRE - Division des Grands Ouvrages - Centre des Techniques Ouvrages d'Art
SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes)

SETRA - 46, Avenue Aristide Briand, F-92223 BAGNEUX-FRANCE
Téléphone : 01.46.11.31.31 - Télécopie : 01.46.11.31.69

Renseignements techniques : R. CHAUSSIN - LCPC/DTOA - Tél. : 01.40.43.50.91
B. GODART - LCPC/DFDOA - Tél. : 01.40.43.53.32
J. LEFEVRE - SETRA/CTOA - Tél. : 01.46.11.31.44

Bureau de Vente - Tél : 01.46.11.31.53 - 01.46.11.31.55

Référence du document : F 9648 - ISSN 1250-8705

Classification thématique au catalogue des publications du SETRA : A06

Ce document a été édité par le SETRA, il ne pourra être utilisé ou reproduit même, partiellement sans son autorisation.

AVERTISSEMENT :

Cette série de documents est destinée à fournir une information rapide. La contrepartie de cette rapidité est le risque d'erreur et la non exhaustivité. Ce document ne peut engager la responsabilité, ni de son auteur, ni de l'administration. Les sociétés citées le cas échéant dans cette série le sont à titre d'exemple d'application jugé nécessaire à la bonne compréhension du texte et à sa mise en pratique.