

RENFORCEMENT DU VIADUC DE CHASSE-SUR-RHÔNE SUR L'AUTOROUTE A7N

Jean-Michel ODIN, Stéphane LAURAND
ARCADIS
Pascal FERRATON
FREYSSINET

1. PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Le viaduc de Chasse-sur-Rhône (désigné VIPP 211) est situé sur l'autoroute A7N dans l'Isère (38), à une vingtaine de kilomètres au sud de Lyon. Cet ouvrage permet le franchissement d'une zone résidentielle de la commune de Chasse-sur-Rhône.



Figure 1 : vue générale du chantier

Construit en 1963, il s'agit d'un viaduc à poutres préfabriquées précontraintes de type VIPP comportant 9 travées indépendantes d'une longueur totale d'environ 300 m.

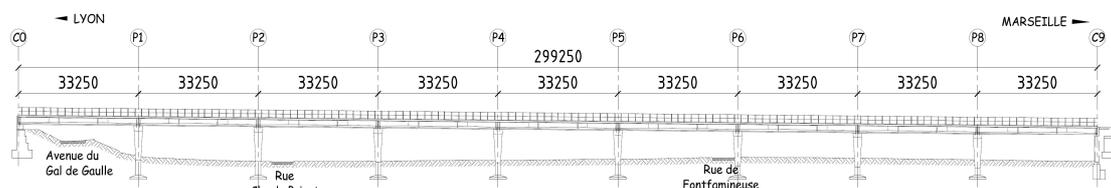


Figure 2 : coupe longitudinale de l'ouvrage

Chaque travée est composée de 8 poutres d'une portée d'environ 32 m, précontraintes par des câbles du type 12Ø8. Chaque poutre courante comporte 10 câbles de précontrainte dont 4 sont relevés et ancrés sous la chaussée.

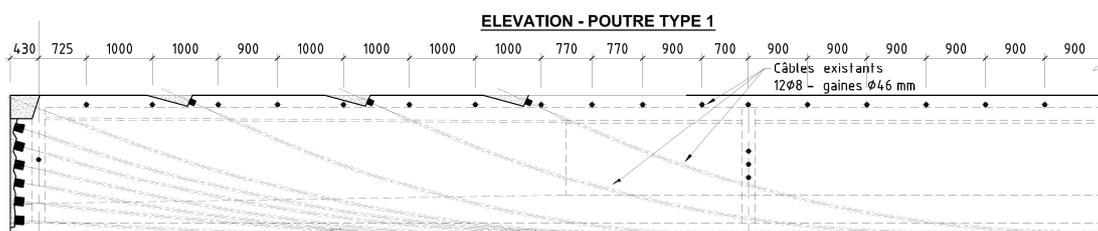


Figure 3 : élévation d'une poutre courante – tracé des câbles de précontrainte existants



Le hourdis est de type intermédiaire, coulé en place entre les poutres principales. La solidarisation du hourdis s'est faite uniquement par la mise en place d'une précontrainte transversale.

Les poutres sont liaisonnées transversalement par des entretoises. Les entretoises ont été coulées en 2^{ème} phase et la solidarisation transversale est assurée uniquement par l'intermédiaire de câbles transversaux du type 12Ø8.

Le tablier, d'une largeur de 27,80 m, porte 2 x 3 voies de circulation. A l'origine, le VIPP 211 était constitué de deux tabliers indépendants. En 2005, des travaux ont permis l'élargissement de la largeur roulable en rendant continu transversalement le hourdis et les entretoises.

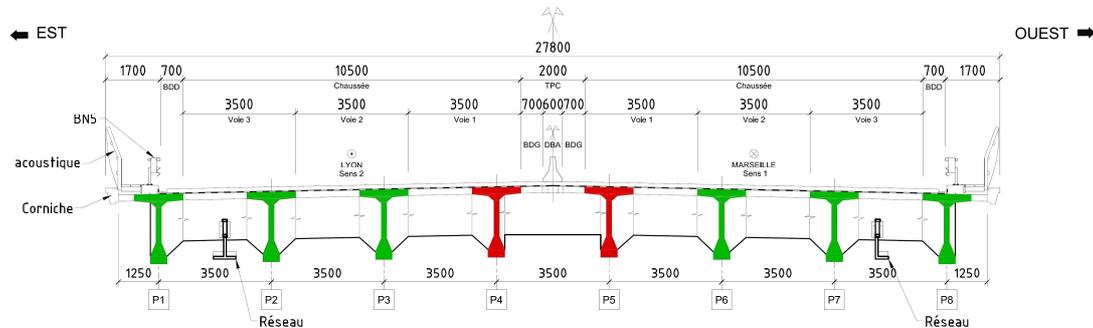


Figure 4 : coupe transversale de l'ouvrage – les poutres 4 et 5 comportent un câble relevé supplémentaire

2. CONTEXTE DE L'OPERATION

Le VIPP 211 est entretenu par le concessionnaire autoroutier ASF (Vinci Autoroutes) depuis de nombreuses années. La DOIE et la Direction Technique ASF ont lancé en 2009 une importante campagne d'investigations sur cet ouvrage.

Cette campagne, réalisée par le LERM, a intégré des relevés et mesures in-situ ainsi que des mesures en laboratoire.

Les caractéristiques des matériaux et des superstructures ont ainsi pu être évaluées.

Il ressort de cette campagne les principaux éléments suivants :

- une carbonatation du béton ayant atteint le premier lit des armatures passives,
- la présence d'ions chlorure, notamment dans les gaines de précontrainte,
- aucun fil de précontrainte rompu parmi ceux investigués,
- une tension résiduelle de la précontrainte des poutres de 813 MPa (tension faible mais classique pour des câbles de ce type et de cette époque),
- des défauts d'injection aux extrémités de gaines,
- une corrosion des ancrages et fils aux extrémités de gaines.

Une mission maîtrise d'œuvre études a ensuite été confiée à EGIS JMI pilotée par ASF DOIE et son AMO, ARCADIS. Cette mission a conduit à établir un projet complet de renforcement du tablier du viaduc de Chasse-sur-Rhône.

Au final, les travaux de renforcements, sous maîtrise d'œuvre travaux ARCADIS, ont été confiés au groupement FREYSSINET – CAMPENON BERNARD REGIONS et comprennent :

- la mise en œuvre de composites en fibres de carbone et précontrainte additionnelle,
- l'imprégnation d'une partie des gaines de précontrainte par un inhibiteur de corrosion,
- la réinjection d'une partie des gaines de précontrainte au coulis de ciment,
- le remplacement des appuis néoprènes et la réfection des bossages.

3. PHILOSOPHIE DU RENFORCEMENT DU TABLIER

Le VIPP 211, construit au début des années 60 fait partie de la génération des ouvrages de type VIPP construits avant la parution de l'IP1 et du dossier type du SETRA VIPP67. Les calculs effectués à l'époque étaient basés sur la circulaire de 1953 pour le béton précontraint et le comportement du matériau béton précontraint n'était alors pas encore bien connu.

A cette époque, les densités de ferrailage passif mis en œuvre dans les tabliers dont tous les éléments étaient précontraints (poutres, entretoises et hourdis) étaient très faibles. Certaines sections de liaison entre une partie préfabriquée et une partie coulée en place voient même une absence totale d'armatures passives.

En présence de tels ouvrages, il est clair qu'en cas de rupture de fils de précontrainte par corrosion, une rupture fragile des poutres peut se produire. Ce risque est identifié comme relativement élevé sur cet ouvrage dont les gaines sont particulièrement mal injectées aux extrémités.

Le renforcement du tablier a donc été guidé par les résultats des investigations et par la gestion du risque de rupture de fils de précontrainte.

Le recalcul de l'ouvrage a été effectué selon plusieurs configurations et hypothèses permettant d'appréhender la ductilité du comportement du tablier. Il a mis en évidence des dépassements des critères réglementaires du BPEL (tous les calculs ont été réalisés selon les règlements français).

Des scénarii pessimistes de rupture de fils de précontrainte ont été établis en se basant sur les résultats des investigations (défauts d'injection et état dégradé aux extrémités de câbles) et pour tenir compte de dégradations futures éventuelles.

Différents scénarii de ruptures de fils ont ainsi été envisagés pour la détermination des renforts de flexion, d'effort tranchant, d'équilibre du coin et de bielle d'about des poutres principales et entretoises. Il n'a pas été considéré un scénario de rupture de précontrainte au niveau du hourdis étant donné que ce dernier présente une réserve de ductilité suffisante, y compris en cas de rupture partielle de précontrainte. Le hourdis n'a donc pas fait l'objet de renforcement.

Les risques de rupture de fils sont considérés plus élevés aux extrémités de câbles du fait d'un manque de coulis d'injection près des ancrages (impossibilité de ré-ancrage dans ce cas) et de la facilité d'entrée des polluants par les ancrages de câbles.

L'ouvrage comportant un total de 72 poutres, il a été recherché une solution de renforcement des poutres assurant la pérennité de l'ouvrage tout en limitant les coûts de travaux.

Ainsi, il a été fait le choix d'associer un renforcement « léger » à la flexion (par composite carbone) à un traitement par imprégnation d'inhibiteur de corrosion des gaines de précontrainte des câbles relevés (câbles les plus soumis aux polluants). L'imprégnation d'inhibiteur de corrosion est suivie d'une réinjection au coulis de ciment micro fin des gaines de précontrainte à leurs extrémités ce qui permet un ré-ancrage des fils même en cas de rupture. Ce choix de renforcement, en limitant les risques de rupture et en augmentant les possibilités de ré-ancrage, permet de s'affranchir de précontrainte additionnelle longitudinale puisqu'il prolonge la durée de vie de la précontrainte existante de manière significative.

Le renforcement des abouts de poutres pouvant être réalisé par ajout de composite carbone, les câbles ancrés aux abouts de poutres ne sont pas traités par inhibiteur de corrosion.

4. RENFORCEMENT DES POUTRES PRINCIPALES

Les poutres principales sont renforcées à la flexion par collage en fibre inférieure de 3 couches de tissu fibre de carbone (procédé Foreva® TFC de FREYSSINET).

Il en est de même pour les renforcements à l'effort tranchant. Les renforts sont constitués d'une seule couche de tissu mise en œuvre par bandes de 0,15 m de largeur en faisant le tour de chaque retombée de poutre avec si nécessaire un ancrage par mèches dans le hourdis. Un dispositif anti-poussée au vide par mèche d'ancrage est mis en œuvre à la jonction âme / gousset inférieur de la poutre. La majorité de l'espace sous le tablier est circulaire, les travaux de renforcement en travée sont donc réalisés depuis des nacelles ciseau.

Au niveau des abouts de poutres, les scénarii de ruptures de fils de précontrainte ont conduit à des manques de section relativement importants. Les renforts d'équilibre du coin comportent 3 couches de TFC ancré au moyen de plaques inox. Le système d'ancrage par mèche ou par plaque inox permet d'augmenter significativement le taux de travail du TFC de 417 MPa à 789 MPa à l'ELU.



Figure 5 : mise en œuvre d'une mèche d'ancrage anti-poussée au vide sur une bande de TFC de renfort à l'effort tranchant

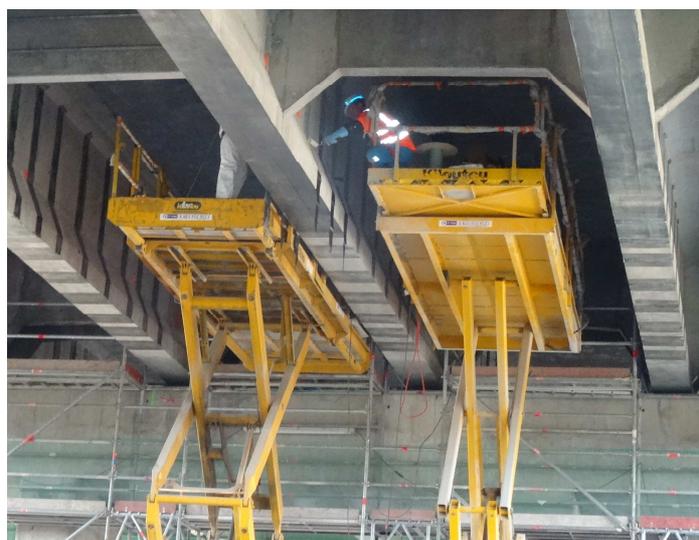


Figure 6 : travaux sur nacelles de mise en œuvre des bandes de TFC de renfort à l'effort tranchant



Figure 7 : abouts de poutres : ancrage du TFC par plaque inox

Tous les travaux de renforcement des poutres principales sont réalisés sous circulation sans gênes à l'exploitation autoroutière.

5. RENFORCEMENT DES ENTRETOISES

Seules les entretoises d'about sont renforcées. Ce renforcement est dimensionné par le vérinage du tablier. Cet ouvrage n'a pas été conçu pour permettre le remplacement de ses appareils d'appui néoprènes et aucun emplacement de vérinage n'est prévu.

Le vérinage de l'ouvrage est effectué avec le système LAO® de FREYSSINET. La centrale hydraulique centralise le pilotage de l'ensemble des vérins en assurant le déplacement de l'ouvrage dans un plan fixe. Une dénivellation maximale de 0,3 mm entre 2 vérins est prise en compte dans les calculs, valeur légèrement supérieure à la précision de mesure du système.

La prise en compte de cette dénivellation a conduit à renforcer les entretoises d'about de chaque travée à l'aide de 3 monotorons gainés graissés du type T15S. L'effet de cette précontrainte additionnelle sur les entretoises et le taux de compression ont été étudiés à l'aide d'un modèle 3D aux éléments finis d'une travée complète. Les mesures effectuées sur place ont montré que la souplesse réelle de l'ouvrage était plus importante que celle issue du modèle 3D, ce qui va dans le sens de la sécurité.

Les monotorons sont ancrés sur des massifs additionnels coulés en place dans la hauteur de l'âme à l'about des poutres de rive. Ces massifs servent également au vérinage du tablier. Ils sont liaisonnés aux poutres de rive par l'intermédiaire d'une précontrainte de clouage constituée de 4 barres de précontrainte du type Freyssibar Ø 36 mm.



Figure 8 : about de poutre de rive : massif béton d'ancrage des monotorons et barres de précontrainte de serrage pour reprise des efforts de vérinage

6. IMPRÉGNATION D'INHIBITEUR DE CORROSION ET REINJECTION AU COULIS DE CIMENT MICRO FIN DANS LES GAINES DE PRÉCONTRAINTÉ (PROCÉDÉ FOREVA® ULTRASONS)

a. Description du procédé

Ce procédé a été mis au point dans les années 90 par la société PMD ATEAV SYSTEMS. Il s'agit désormais du procédé Foreva® Ultrasons de FREYSSINET.

Il consiste à faire pénétrer à l'intérieur de gaines de précontrainte injectées au coulis de ciment un inhibiteur de corrosion dans l'objectif de stopper la progression du phénomène de corrosion des câbles de précontrainte. Les gaines sont ensuite réinjectées par un coulis de ciment micro fin adapté à cette application.

L'imprégnation du coulis existant, par l'inhibiteur de corrosion, est réalisée par l'utilisation d'une pompe alternative à ultrasons de puissance qui aboutit à saturer en inhibiteur le milieu qui entoure les câbles de précontrainte.

L'utilisation d'une pompe alternative à ultrasons de puissance permet de créer des surpressions et des dépressions alternatives à la fréquence ultrasonore. L'action des ultrasons induit un état de cavitation en phase vapeur du liquide inhibiteur. L'énergie ainsi libérée permet de dégager les macros pores du coulis en contact avec les aciers de précontrainte, favorisant la pénétration de l'inhibiteur.

Injecté à saturation, l'inhibiteur agit au niveau de la couche extérieure de l'acier des câbles de précontrainte de manière à mettre un point d'arrêt au processus de corrosion.

Les mesures du temps nécessaire pour saturer les câbles de proche en proche permettent de dresser une cartographie précise des vides de coulis de ciment. La réinjection ciblée des vides avec un micro-ciment et, au départ des mêmes injecteurs, devient dès lors une opération aisée et fiable.

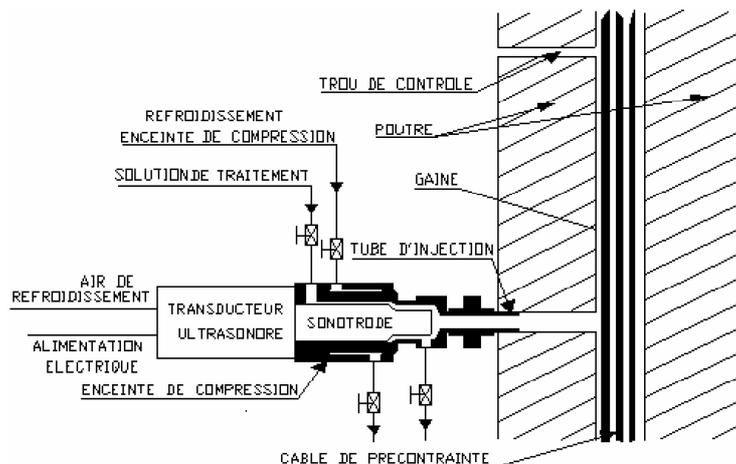


Figure 9 : principe général de fonctionnement de la pompe à ultrasons

b. Application du procédé

Les risques les plus importants de corrosion des câbles existants sont ceux par piqûre induite par les chlorures. L'inhibiteur de corrosion mis en œuvre est actif même en cas de présence de taux de chlorure élevé. Dans le cas du VIPP 211, il a été fait le choix de traiter systématiquement à partir de tous les points de mesure dont le taux de chlorure totaux est supérieur à 0,1 % de la masse de ciment soit 0,053 % de la masse totale du coulis prélevé.

Les opérations nécessaires à l'aboutissement complet des opérations d'inhibition de la corrosion des câbles de précontrainte, de la détermination de la cartographie des vides jusqu'à la réinjection des vides, peuvent se décrire comme suit :

1. Repérage des câbles de précontrainte,
2. Prélèvement du coulis,
3. Mesure des chlorures dans le coulis prélevé,
4. Perçage des trous d'injection et de contrôle,
5. Injection / imprégnation de l'inhibiteur de corrosion par pompe alternative à ultrasons en contrôlant le pH de la solution inhibitrice,
6. Réinjection de coulis de micro-ciment suivant cartographie inhibiteur.

c. Mise en œuvre du procédé

La mise en œuvre du procédé est réalisée en deux phases distinctes.

Elle nécessite dans un premier temps des travaux préalables afin de définir les zones contaminées et de connaître le degré d'injection (présence de vide) des gaines de précontrainte existantes. Les travaux préparatoires consistent à réaliser des prélèvements du coulis existant, sans endommager les câbles de précontrainte (opérations 1 à 3).

Pour la réalisation de cette opération, il est nécessaire de réaliser les tâches élémentaires suivantes :

- Le repérage des câbles existant par auscultation radar,
- Le forage du béton jusqu'à la gaine de précontrainte,
- Le percement de la gaine, et le prélèvement du coulis en débutant au plus près de la tête d'ancrage des câbles,
- L'analyse du coulis de ciment (taux de chlorures),
- La réalisation de nouveaux forages sur tous les câbles où la tête d'ancrage présentait une pollution aux chlorures (un forage est réalisé tous les 0,50 m environ le long du câble sur une distance égale à 2 m, puis prolongé si nécessaire) et de nouvelles analyses jusqu'à obtenir le long de chaque câble au moins une mesure de taux de chlorure en-dessous du seuil de traitement,
- La réalisation d'une cartographie des chlorures,
- La qualification visuelle du degré de corrosion des fils et de l'état de remplissage de la gaine.

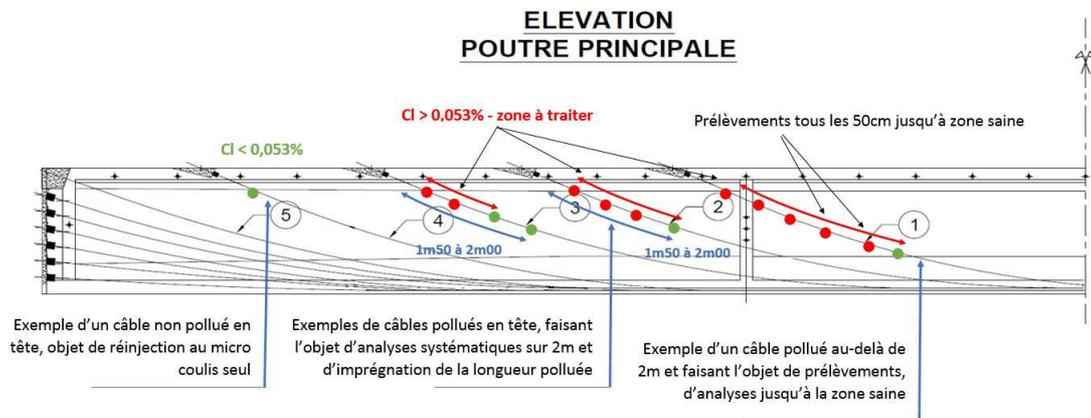


Figure 10 : exemple de cartographie des résultats des mesures de teneur en chlorure du coulis de gaine



Figure 11 : injecteurs en place le long du tracé des câbles relevés



Figure 12 : transducteur ultrasonore d'injection d'inhibiteur de corrosion dans les gaines de précontrainte

Dans un deuxième temps, lorsque la cartographie complète du câble est réalisée, les travaux d'imprégnation de l'inhibiteur de corrosion, puis d'injection complémentaire au coulis de micro-ciment peuvent débuter (opérations 4 à 6). Le traitement est réalisé en suivant les étapes :

- Scellement des injecteurs dans les forages distants d'environ 0.50 m,
- Test d'étanchéité en insufflant de l'air comprimé depuis chaque injecteur un à un,
- Test au passage d'air d'un injecteur à l'autre afin de caractériser l'état de remplissage des gaines,
- Mise en place du transducteur,
- Injection de l'inhibiteur de corrosion à une pression de 4 bars environ sur les zones polluées,
- Suivi de l'imprégnation de l'inhibiteur (progression, durée et volume),
- Réinjection au coulis de ciment micro fin par les mêmes injecteurs,
- Arrachage des injecteurs et colmatage des perçages.



Figure 13 : poste de travail sur nacelle de l'atelier d'imprégnation d'inhibiteur de corrosion dans les gaines de précontrainte

L'imprégnation est considérée suffisante lorsque la solution inhibitrice percole au niveau du ou des injecteurs situés de part et d'autre qui ont alors un rôle d'évent. Les durées d'imprégnations sont variables (de 30 mn à 2 h) selon les points en fonction du remplissage de la gaine par le coulis de ciment existant. Les têtes d'ancrage des câbles de précontrainte pollués sont systématiquement imprégnées sur une durée de 2 heures.

Un contrôle de l'imprégnation est réalisé a posteriori par échantillonnage. L'inhibiteur de corrosion étant à base de nitrite, un contrôle de présence de nitrite sur des échantillons de coulis prélevés est réalisé.

7. AUTRES TRAVAUX RÉALISÉS DANS L'OPÉRATION

Le tablier est vériné sur chaque file d'appui pour permettre le remplacement de tous les appareils d'appuis néoprène. Le tablier est, au cours de cette opération de vérinage, définitivement remonté de 6 cm afin de mettre hors d'eau les appuis néoprènes situés sous les poutres de rive qui ne comportaient pas de bossage. Ces travaux exécutés de nuit sont réalisés sur 3 week-ends (nuit du samedi au dimanche) sous coupure totale de la circulation autoroutière.

Enfin, les travaux comprennent la réparation des épaufrures et aciers apparents (ragréages, injections de fissures et passivation des aciers) ainsi que l'application d'un produit bouche-pore (de type LHM) sur les rives du tablier directement soumises aux intempéries.

8. PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'Ouvrage : ASF DOIE

Assistant Maitrise d'Ouvrage Etudes : ARCADIS

Maitre d'œuvre Etudes : EGIS JMI

Maitre d'œuvre Travaux : ARCADIS

Contrôle extérieur Chantier : CONCRETE

Coordonnateur SPS : BUREAU VERITAS

Groupement d'entreprises : FREYSSINET – CAMPENON BERNARD REGIONS

Principaux sous-traitants :

- Etudes d'exécution et méthodes : FREYSSINET – BE ARLAUD
- Assistance à l'imprégnation ultrasonore par inhibiteur des gaines de précontrainte : PMD ATEAV SYSTEMS
- Mesures de teneurs en chlorure du coulis : IN SITU
- Hydrodécapage : THP
- Echafaudages : ARNHOLDT

9. PRINCIPALES QUANTITÉS

Renforts TFC : 5 500 m²

Précontrainte additionnelle : 3 100 kg

Remplacement d'appuis néoprènes : 144 unités

Imprégnation ultrasonore d'inhibiteur et réinjection au coulis de ciment micro fin : 450 câbles

Mesures de teneur en chlorure du coulis de gaine : plus de 1 500 unités