Contribution à l'étude de la protection contre l'abrasion et les chocs des ouvrages hydrauliques

Contribution to the study of the protection against abrasion and impacts affecting hydro-electric facilities

J. Gentil et J. Mousty

Sika S.A.

I. Rappel sur les problèmes d'abrasion et d'érosion — Les solutions traditionnelles

La protection contre l'abrasion des ouvrages hydrauliques, depuis un certain nombre d'années, a été l'un des soucis des ingénieurs spécialisés dans la construction des barrages.

En quelques décades et grâce notamment au développement important des nouveaux matériaux de synthèse, les techniques utilisées pour la protection des ouvrages hydrauliques ont fait de sensibles progrès.

Des bétons classiques aux granulats siliceux, souvent adjuvantés, la technique a évolué tout d'abord vers les bétons de corindon dont l'indice de résistance à l'abrasion, deux ou trois supérieur à celui d'un béton classique, apportait une amélioration non négligeable dans la lutte contre l'usure engendrée par des eaux chargées circulant à grande vitesse.

Dans le même temps, l'utilisation de blocs de granit, choisis pour leur parfaite homogénéité, a permis l'obtention de revêtements de grande qualité bien que pose et jointoiement aient toujours posé de délicats problèmes de chantier.

Puis, les découvertes récentes dans le domaine des résines époxydiques ont permis d'envisager et d'utiliser les bétons d'époxy en protection de surface de radier de barrage. Les qualités propres à ce type de résine, que nous rappelons brièvement :

- Fortes résistances mécaniques (compression - flexion)
- Excellente adhérence sur supports alcalins
- Faibles indices d'usure
- Retrait presque nul

sont apparues comme déterminantes dans l'effort de recherche des ingénieurs hydrauliciens et des laboratoires spécialisés.

Depuis un certain nombre d'années, les époxy brais ont été également utilisés grâce à leur faible module d'élasticité qui assure aux revêtements à la fois une meil-

leure résistance aux chocs et une bonne tenue à l'usure. Sur un grand nombre d'ouvrages de la Compagnie Nationale du Rhône, on a ainsi utilisé ce type de revêtement (Villeneuve-les-Avignon — Péage du Roussillon).

Enfin, les dernières recherches ont permis de tester en laboratoire, puis en vraie grandeur, l'efficacité des revêtements souples pour les ouvrages soumis à des abrasions de charges fines notamment. A notre connaissance et à partir des tests effectués par le Laboratoire C.N.R., quelques chantiers ont déjà été réalisés en France et à l'étranger suivant cette technique.

Nous examinons maintenant, l'intérêt, les avantages, les inconvénients et surtout les limites d'utilisations de ces différentes techniques.

II. Revêtements en blocs de granit ou de basalte

Si nous ne pouvons pas apporter beaucoup d'informations au niveau de la fabrication de ces revêtements, une question nous est souvent posée, concernant la fixation ou le collage de ces types de revêtements sur divers supports : béton et acier.

2.1. Sur l'aménagement E.D.F. d'Eygliers — Maison du Roy, construit entre 1978 et 1981, le scellement des blocs de granit de 290 kg a été réalisé à l'aide d'un *mortier hydraulique prédosé* contenant une forte proportion de résine en émulsion et présentant de hautes performances tant en adhérence qu'en résistances mécaniques. (fig. 1).

Le contrôle des adhérences sur les sous-faces lisses des blocs a été testé par le laboratoire du Cemete d'Aix-en-Provence.

2.2. Dans les mines de phosphate de Taiba, le minerai est transporté par une veine liquide empruntant un canal en métal, tapissé de pavés de basalte. La vitesse du courant est de l'ordre de 6 mètres/seconde avec une pente de 10 à 15 %.

Figure 1 — Aménagement E.D.F. d'Eygliers. — Scellement des blocs au SIKATOP 122.

Le collage de ces dalles de basalte sur les flancs métalliques et dans le fond du canal a été réalisé, après essais, à l'aide d'une colle époxydique épaisse et thixotrope. Rappelons simplement qu'en dehors du choix du produit de collage, la préparation du support est primordiale, de même que l'adéquation aux chocs thermiques éventuels.

III. Protection légère aux eaux à faible vitesse et faiblement chargées

La centrale hydro-électrique du Pont Rouge située en Bretagne, à 50 km au Nord de Lorient, sur la commune de Silfiac, comporte un canal d'amenée d'eau, de 960 m de longueur et de 3 m x 1,30 m de section, une conduite forcée et une petite usine munie de deux turbines Francis. La vitesse de l'eau dans le canal est faible : 0,70 mètre/seconde, mais les eaux pures (granitiques) sont agressives (fig. 2).

En 1966, lors de la mise en eau de l'ouvrage, l'utilisateur a constaté une perte de charge de 18 cm due à la rugosité initiale du béton et à la présence de courbes dans le canal. De 1966 à 1979, la perte de charge a augmenté fortement, diminuant ainsi le rendement de la petite usine.

Un revêtement du canal a été jugé nécessaire pour s'opposer à l'usure du béton, usure entraînant une rugosité de plus en plus marquée, et augmentant la perte de charge d'année en année.

Un mortier fin hydraulique prédosé à hautes performances, fortement chargé en résine en émulsion, a été retenu par l'ingénieur Conseil et préféré à la solution "résine époxydique" à cause du contexte local (humidité, froid) et du risque de cloquage dû à une trop grande imperméabilité à la vapeur.

Cette solution a été réalisée par projection (2 kg/m^2) à la machine Super Granita de Kremlin après un nettoyage à l'eau sous haute pression. Les joints ont été ensuite traités par procédé spécial Combiflex à partir d'une bande hypalon collée à la colle époxydique (Sikadur 31 Colle).

Après plusieurs années d'utilisation, le revêtement donne toujours satisfaction : pas de farinage, pas d'usure prématurée, pas de cloquage et une perte de charge réduite à sa valeur initiale.

IV. Le reprofilage d'un évacuateur de crue sur le barrage de Tamzaourt au Maroc

Dans le cas de barrages de grande hauteur, où l'eau s'évacue à une vitesse très élevée on observe, suivant le mode d'écoulement, des phénomènes de cavitation, générateurs de désordres, qui peuvent être importants, notamment à la surface du béton et sur le profil des coursiers.

Dans le cas du Barrage de Tamzaourt, il fallait s'efforcer d'améliorer l'état de surface du béton à différents

Figure 2 — Chantier de Silfiac près de Cleguerec (56). — protection d'un canal en SIKATOP 141 — $5\,500 \text{ m}^2$.

niveaux et tout particulièrement aux changements brusques de pente dans le profil du coursier afin d'éliminer :

- Le bullage et
- Les irrégularités de surface observées aux reprises de bétonnage notamment.

Il s'agissait d'un barrage à contre-fort comprenant 27 plots et trois évacuateurs de surface avec saut de ski. La hauteur du barrage sur fondations était de 97 mètres et la hauteur de chute de 68 mètres au maximum.

Le travail à réaliser consistait en :

- La mise au gabarit des parements de béton,
- L'obturation des trous de barres de coffrage,
- Le traitement du bullage de surface (important à cause des coffrages inclinés).

Ce dernier point a nécessité pour l'application d'un enduit de ragréage mince sur 750 m² environ, par bandes de 2 m de hauteur sur 11 m de large :

- La préparation du support à l'aide d'un sablage ou d'un bouchardage mécanique, complété par un lavage à haute pression.
- Un mortier hydraulique prédosé à hautes performances, Sikatop 121, qui a été préféré au ragréage époxy là encore, pour des raisons climatiques (ensoleillement – chocs thermiques) (chacun sait que les époxy ont des coefficients de dilatation nettement plus élevés que ceux des bétons et mortiers et que le choix du produit de réparation doit en tenir compte).
- Après application de l'enduit de ragréage d'une épaisseur moyenne de 2 mm, pulvérisation d'un produit de cure, agréé Copla, car le travail avait été exécuté en période chaude (juin et juillet avec 45°C à l'ombre).
- Enfin, pour parachever le curing, arrosage de la surface en continu pendant plus de deux semaines.

Malgré les difficultés rencontrées, dues à la géométrie de l'ouvrage et au climat, il n'a été enregistré, grâce à ces précautions, ni fissuration, ni faïençage, ni décollement du revêtement lui-même.

Les seules fissures apparues étaient transversales et au droit de chaque reprise de bétonnage. Elles ont été reprises et traitées par ouverture et bourrage au cours d'une période fraîche (ouverture maximale).

V. La protection "anti-chocs" : réalisation de deux pertuis de fond au barrage de Vinça sur la Tet (fig. 3)

Situé dans les Pyrénées Orientales, le Barrage de Vinça est du type "poids", d'une hauteur maximale 51 mètres et d'une largeur de 190 mètres linéaires. Il comporte deux évacuateurs de surface et deux pertuis de vidange de fond capables de débiter à eux deux 1 000 m³/seconde.

Un premier béton hydraulique avec agrégats de corindon s'était rapidement dégradé au passage des premières crues qui charriaient des blocs de rocher imposants pouvant aller jusqu'au mètre cube.

Entre août et septembre 1977, l'Ingénieur Conseil décidait d'améliorer l'état de surface des bétons à l'aide d'un mortier de résine époxydique et corindon.

Comme on le verra plus loin, cette solution correspondait à un indice d'usure faible, une cohésion interne

Figure 3 – Barrage de Vinça.

élevée due à la présence du liant résine, donc une bonne résistance au choc, une adhérence de la chape excellente.

De plus, aucun problème de dilatation différentielle n'était à craindre étant donné la protection thermique apportée par la position même en galerie des radiers des pertuis.

La préparation du support et le réglage précis de la chape ont été les deux points délicats du chantier.

A notre connaissance, la réparation s'est bien comportée jusqu'à ce jour.

VI. La protection "anti-abrasion" : les revêtements souples

Chacun sait que pour obtenir une bonne protection contre une forte abrasion, deux types de revêtements sont possibles :

- Le revêtement extra dur du type blindage métallique ou béton de résine/corindon,
- Le revêtement souple du type caoutchouc.

Ce dernier système présente toutefois un inconvénient majeur : la fixation par collage au support n'a jamais pu être réalisée avec sécurité et la plupart des petits ouvrages (prises d'eau en montagne) où ce système a été utilisé, ont péri par manque d'adhérence et décollement.

- Le tableau I montre cependant l'intérêt d'une telle solution pour la résistance à l'abrasion des charges fines charriées à grande vitesse.

- Des essais réalisés avec l'aimable collaboration de la C.N.R. sur ses installations du Laboratoire de Bourg-

Figure 4 — Principe de la machine pour réalisation du test d'abrasion.

Tableau I
Indices d'abrasion de différents revêtements

Matériaux testés	Indice C.N.R.
Verre de référence C.N.R.	1
Béton à 350 kg de ciment/m ³	3,5 à 4
Béton à 600 kg + corindon	0,90 à 1
Béton de résine époxydique	0,80 à 0,90
Granit	0,65 à 0,75
Béton de brai-époxy corindon	0,55 à 0,65
Revêtement souple SIKAFLEX KW	0,15 à 0,20

lès-Valence pour vérifier la tenue de revêtements à l'abrasion de charges fines, puis aux chocs (fig. 4) ont montré que, pour qu'un revêtement "souple" puisse tenir à ces deux sollicitations (abrasion et choc) sans usure anormale ni perte d'adhérence, il fallait que plusieurs conditions minimales soient remplies :

- Une dureté "shore" de surface comprise entre 75 ou 80
- Une adhérence sans faille au support (18 à 20 bars au moins)
- Une épaisseur suffisante pour permettre la diffusion des contraintes dues aux chocs et éviter ainsi le matage du support.

Les quelques exemples de chantiers réalisés par le Département Travaux de notre Société montrent à la fois l'intérêt et les limites du procédé mis en œuvre à partir de résines du type polyuréthane chargées.

Ce procédé, amélioré au fur et à mesure des travaux réalisés, comporte les phases suivantes :

- Une préparation soignée du support béton,
- Un reprofilage général à l'aide d'un mortier de haute performance,
- L'application, en une passe, de la résine chargée sur une épaisseur suffisante,
- La finition éventuelle (surface — joints — points singuliers).

Le tableau de comparaison I montre, au niveau laboratoire, les excellents indices d'abrasion obtenus sur ce type de revêtement (SIKAFLEX KW2).

6.1. Une première mondiale : les pertuis de vidange de fond du barrage de Khashm El Girba au Soudan

Situé sur l'Atbara, à quelques 500 km à l'Est de Khartoum, ce barrage à contrefort a été achevé en 1964.

Haut de 54 m, il sert principalement à l'alimentation d'un canal d'irrigation avec un débit de 100 m³/seconde, sous une charge de 25 à 35 mètres d'eau. Environ 400 000 tonnes de sédiments fins traversent chaque année chaque mètre des pertuis dont la partie centrale, de part et d'autre des appuis de vanne, était protégée par un blindage métallique.

Après 13 années d'exploitation, les tôles, épaisses de 12 mm, présentaient des signes d'usure importants et une rénovation s'imposait.

Dans l'impossibilité de refaire un blindage à neuf (délais — prix...), la solution retenue par l'Ingénieur Conseil après de nombreux tests et essais effectués au laboratoire de la C.N.R. fut la réfection globale à l'aide d'un revêtement souple à base de résine polyuréthane chargée.

Sept années ont passé depuis ces travaux de réparation. Après les premières difficultés dues à un défaut de la sous couche en mortier d'époxy, le revêtement est entretenu chaque année et l'usure, hors phénomènes de chocs dus au passage de troncs d'arbre à grande vitesse, est négligeable sur les parties courantes.

6.2. Un revêtement souple pour Grand-Maison : dans la conduite de détournement du Flumet (fig. 5 et 6)

En automne 1980, plus de 830 m² de revêtement souple en résine de polyuréthane chargée ont été appliqués au radier et aux bajoyers de la conduite de détournement du Flumet pour en assurer la protection contre l'abrasion.

L'épaisseur en radier est de 8 mm et sur les parois de 1 mm. L'application a été réalisée par l'intermédiaire

Figure 5 — Grand'Maison — revêtement souple.

Figure 6 — Grand'Maison — revêtement souple.

d'un primaire d'accrochage époxydique, sur un mortier de dressage à haute performances.

6.3. La protection des passes du Barrage de Saint-Guillaume (fig. 7).

Dans l'été 1982, l'E.D.F. prévoit pour la protection contre l'abrasion, due au passage des sables et graviers charriés par la Romanche, la mise en place d'un revêtement souple à base de polyuréthane dans les deux passes.

Figure 7 — Protection des passes du barrage de St-Guillaume.

Le travail est confié à Sika Travaux. Une première passe a été revêtue au cours de l'été 82, la deuxième était prévue pour le courant février 83. La technique ayant évolué, les opérations suivantes ont été réalisées.

- Préparation du support béton par bouchardage et lavage à haute pression (300 bars)
- Reprofilage à l'aide d'un mortier hydraulique prédosé à haute performance Sikatop.
- Application d'une résine polyuréthane chargée (mortier de 2 cm d'épaisseur) sur primaire époxydique frais (Sikaflex KW5).
- Sur les bajoyers, remontée en plinthe sur 0,2 m, à l'aide d'un mortier fin thixotrope, toujours à base de polyuréthane (Sikaflex KW2T).
- La surépaisseur appliquée, par rapport aux 8 mm de Grand Maison, s'explique par le charroyage important de la rivière en période de fonte des neiges ou par suite de lâchers importants de la retenue du Chambon située quelques kilomètres à l'amont.

VII. Conclusions

Nous venons d'évoquer un certain nombre de réalisations correspondant à des solutions applicables pour résoudre différents types de problèmes. Nous allons nous efforcer de résumer dans le tableau II les possibilités offertes par ces différentes solutions en soulignant leurs avantages et leurs limites.

Ajoutons cependant que la réussite dans le domaine de la protection des ouvrages hydrauliques est fonction d'un certain nombre de facteurs :

- *Choix du type de revêtement* : il est important de bien cerner l'ensemble des agressions possibles en tenant compte de phénomènes qui peuvent sembler non évidents a priori, comme par exemple les chocs thermiques, les agressions chimiques même légères, le passage de troncs d'arbres, etc. . .

La non prise en compte de ces éléments entraîne parfois des reprises coûteuses.

- *Choix de l'entreprise applicatrice* : le produit n'est pas tout et mieux vaut un produit moyen bien appliqué par une entreprise sérieuse qu'un produit performant mal mis en œuvre par un non spécialiste.
- *Préparation des supports* : les défauts d'adhérence sont souvent liés aux problèmes de préparation de support et les conditions d'application sur chantier sont loin des réalisations de laboratoire, aussi l'ingénieur doit-il être attentif à l'état de surface avant application.
- *Protection du revêtement* : elle est indispensable pendant les premières heures, surtout s'il s'agit de mortiers hydrauliques dont la cure est essentielle pour l'obtention du résultat final.
- *Contrôle sur chantier* : là aussi il s'avère indispensable et à tous les stades de l'application. Il peut et doit éviter les mauvaises surprises.

En conclusion, si l'ensemble de ces précautions est réellement appliqué, le résultat sera très certainement à la hauteur des problèmes rencontrés et la vie de l'ouvrage en sera prolongée pour le plus grand bien de tous.

Tableau II

Type de revêtement utilisable en fonction des données de l'écoulement et du type d'ouvrage.

Conditions d'utilisation	Type de revêtement utilisable	Avantages	Inconvénients	Type d'ouvrage	Observations
<ul style="list-style-type: none"> – Eaux peu chargées – Charges fines uniquement – Vitesse faibles ≤ 1 m/s 	<ul style="list-style-type: none"> – Revêtement fin à base de mortier hydraulique et de résine en émulsion – Prédosé 	<ul style="list-style-type: none"> – Faible épaisseur (mm) – Accepte les chocs thermiques – Peu de risque de cloquage – Faible prix de revient – Application facile (projection) 	<ul style="list-style-type: none"> – N'accepte pas les chocs mécaniques – N'accepte pas les agressions chimiques – Curing nécessaire à l'application – Finition "taloché fin" mais non lisse 	<ul style="list-style-type: none"> – Canaux – Réservoirs cuves – Stations d'épuration – Piscines 	<ul style="list-style-type: none"> – Laisse "respirer" le support
<ul style="list-style-type: none"> – Eaux peu chargées – Charges fines uniquement – Vitesses faibles ou moyennes (quelques mètres/sec.) 	<ul style="list-style-type: none"> – Peinture à base de résines synthétiques époxydes ou polyuréthanes 	<ul style="list-style-type: none"> – Faible épaisseur ($\leq$ mm) – Finition lisse – Esthétique – Protection chimique – Application facile (projection) – Prix de revient moyen 	<ul style="list-style-type: none"> – N'accepte pas les chocs mécaniques – Sensible aux pressions capillaires (cloquage) – Sensible aux U.V. (sauf précautions spéciales) – Nécessite une sous couche de dressage – Application par entreprise spécialisée 	<ul style="list-style-type: none"> – Réservoirs, cuves – Piscines couvertes – Stations d'épuration – Parements amonts de barrage 	<ul style="list-style-type: none"> – Des problèmes de bullage ou cloquage dus à la trop grande étanchéité des films
<ul style="list-style-type: none"> – Eaux moyennement chargées en fines et sables – Vitesses faibles ou moyennes (quelques mètres par seconde) 	<ul style="list-style-type: none"> – Revêtement semi-épais à base de mortiers hydrauliques et de résines en émulsion – Prédosés 	<ul style="list-style-type: none"> – Faible épaisseur ($\leq$ cm) – Accepte les chocs thermiques – Peu de risque de cloquage – Application machine (projection) – Accepte les chocs légers et occasionnels (bois flottés légers) 	<ul style="list-style-type: none"> – N'accepte pas les chocs violents (blocs) – N'accepte pas les agressions chimiques – Curing indispensable à l'application – Finition mortier fin non lisse 	<ul style="list-style-type: none"> – Canaux – Bassins – Petits déversoirs – Réservoirs, cuves, piscines – Reprofilage avant revêtements d'usure – Cuvelages en sous pression 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessite une bonne préparation du support et un curing efficace
<ul style="list-style-type: none"> – Eaux fortement chargées en sable – Charriage de blocs, troncs d'arbre – Fortes vitesses du courant 	<ul style="list-style-type: none"> – Revêtements rigides ou semi-rigides à base de mortiers de résine et de granulats durs (quartz, corindons, hématites...) – Epaisseurs centimétriques (2 à 5 centimètres) 	<ul style="list-style-type: none"> – Haute résistance à l'usure et chocs même lourds – Bonne protection chimique 	<ul style="list-style-type: none"> – Prix élevé – N'accepte pas les chocs thermiques – Application délicate uniquement par entreprise spécialisée – Primaire d'adhérence nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> – Radiers de vidange de fond – Bâches de turbines – Bassins de dissipation immergés 	
<ul style="list-style-type: none"> – Eaux fortement chargées en éléments fins, en graviers – Vitesses moyennes ou fortes 	<ul style="list-style-type: none"> – Revêtements souples à base de mortier de résine et de granulats durs (quartz, corindon hématites) – Epaisseurs centimétriques (1 à 3 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> – Très haute résistance à l'abrasion, aux chocs léger répétés – Finition lisse 	<ul style="list-style-type: none"> – Prix relativement élevé – Application délicate uniquement par entreprise spécialisée – Primaire d'adhérence nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> – Radiers de vidange de fond – Evacuateurs de crues – Bâches de turbines – Bassins de dissipation... . 	<ul style="list-style-type: none"> – Réparations ponctuelles faciles

Discussion

Président : M. H. de MAUBLANC

M. MOUSTY fait d'abord une présentation de l'histoire de la recherche par la Société Sika sur ces problèmes, puis *M. GENTIL* présente la communication.

M. CHINCHOLLE rappelle qu'au cours des exposés de la matinée il a été souvent question d'abrasion, soit par une eau chargée, soit par cavitation, mais il semble qu'il n'existe pas d'appareil de mesure de l'intensité ou de la vitesse d'abrasion ; aussi informe-t-il les participants, intéressés par ce problème, que le Laboratoire de Génie Electrique de Paris (Tél. 941.80.40) réalise un appareil donnant instantanément la vitesse d'abrasion – sur un capteur en acier inoxydable par exemple – quelles qu'en soient les causes et qu'il est disposé à apporter toutes informations utiles.

M. CHINCHOLLE est surpris du fait que, dans les différentes solutions proposées aux problèmes d'abrasion, on ne fasse jamais intervenir la durée de vie du matériau dans les comparaisons (ex. $1\,750\text{ F/m}^2$ pour le granite, 750 F/m^2 pour des produits mettant en œuvre des résines).

M. le Président rappelle qu'il est difficile de faire des études comparatives de rentabilité quand on manque d'expérience sur la durée de vie. La seule garantie de 3 ans dont il a été question concerne la mise en place et la technique d'application.

M. GENTIL regrette de ne pas avoir d'aides financières afin de poursuivre des recherches sur ces matériaux en ce qui concerne la cavitation et lance un appel dans ce sens.

En espérant que l'appel lancé sera entendu, *M. le Président* remercie les conférenciers et les intervenants et clôture la séance.