

Les revêtements anti-usure des barrages du Rhône

Anti-wear coatings of the Rhône dams

J. Mamet, N. Llopis et A. D'Angelo

Compagnie Nationale du Rhône

1. Considérations générales

Depuis 1952, la Compagnie Nationale du Rhône a construit 16 barrages mobiles sur le Rhône pour des chutes allant de 6,30 mètres à 13,10 mètres et des débits de crue de projet variant de 2 800 à 14 000 mètres cubes par seconde.

L'énergie maximale dissipée à travers ces ouvrages, de l'ordre de 500 à 4500 kW par mètre linéaire de barrage, ainsi que la teneur en matériaux solides des eaux du fleuve représentent des risques importants de détérioration des radiers par usure et par chocs. Aussi, la C.N.R. a entrepris la recherche d'un matériau offrant la protection la plus satisfaisante contre ces phénomènes. Cette recherche a permis de faire évoluer les techniques de protection vers des matériaux nouveaux plus résistants et moins coûteux et des méthodes de réalisation simplifiées et mieux adaptées aux chantiers de grands travaux.

2. Evolution des protections

Depuis les premiers barrages mobiles construits sur le Rhône, les matériaux de protection utilisés et les méthodes de leur mise en oeuvre n'ont cessé d'évoluer vers des améliorations de qualité et de coût.

2.1. Protection en moellons de granit (Fig. 1)

Pendant de longues années, la protection des radiers des barrages a été assurée par des éléments naturels : les moellons de granit dont la mise en oeuvre et la liaison avec le support en béton armé constituant les radiers, restaient des opérations délicates, laborieuses, coûteuses et aussi mal adaptées aux modes d'exécution des grands chantiers qu'aux réparations des dégradations en cours d'exploitation des ouvrages.

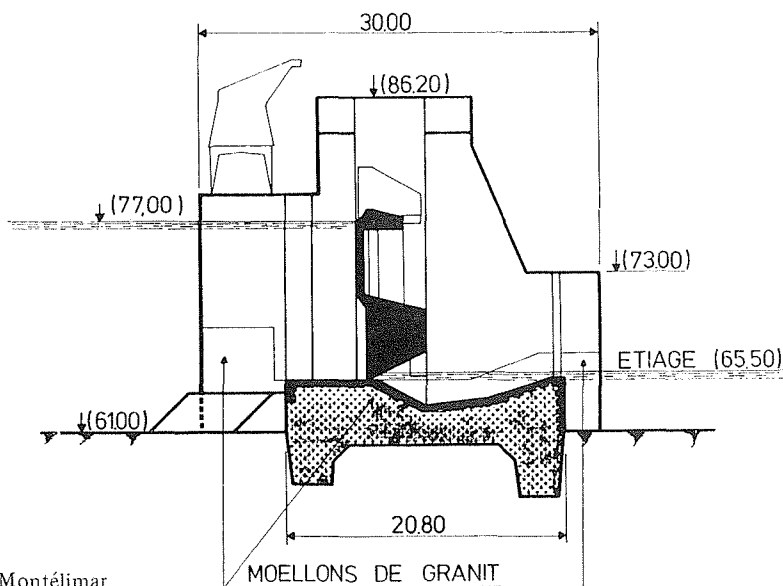


Figure 1 – Coupe du barrage de Montélimar

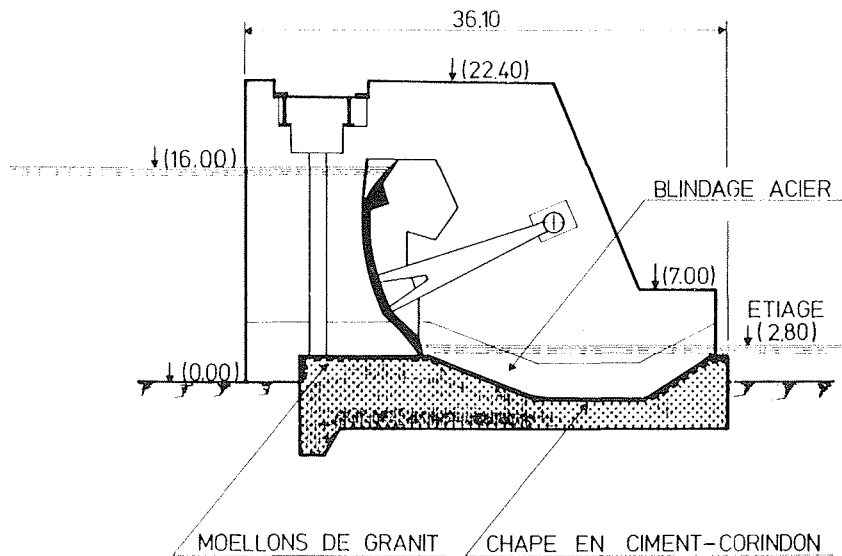


Figure 2 - Coupe du barrage de Vallabrègues

2.2. Chape en ciment-coriandon (Fig. 2)

A la suite d'analyses plus fines des phénomènes d'usure des radiers de barrage, il est apparu que les protections en moellons de granit pouvaient être réduites aux zones les plus sollicitées : seuils de vannes, arêtes, dent de dissipation d'énergie, les autres surfaces pouvant s'accommoder d'une chape de coriandon et de ciment dosée à 700 kg de ciment/m³, de 4 cm d'épaisseur, incorporée à un béton de forme de 11 cm d'épaisseur lié aux radiers par des aciers en attente. Cette chape s'apparente du point de vue de l'usure par abrasion à un granit de qualité médiocre.

De coût moins élevé et de mise en oeuvre moins difficile que celle en moellons de granit, la protection en ciment-coriandon demeurait mal adaptée aux chantiers de grands travaux par ses sujétions de mise en oeuvre.

2.3. Chape en résine synthétique (Fig. 3)

L'apparition sur le marché de nouvelles résines synthétiques moins sensibles à l'humidité, présentant une adhérence excellente sur support en béton et de mise en oeuvre relativement aisée, nous a conduits à envisager leur emploi pour la protection des radiers de barrages.

2.3.1. Choix des résines

Les résines thermoplastiques ayant été écartées en raison de leur sensibilité à la chaleur et aux solvants organiques, nos recherches se sont limitées à trois types de résines thermodurcissables : les polyesters, les polyuréthanes et les époxydes dont la résistance à l'usure par abrasion s'apparente, à l'état pur, à un granit d'excellente qualité.

Notre choix s'est fixé sur les résines époxydes moins

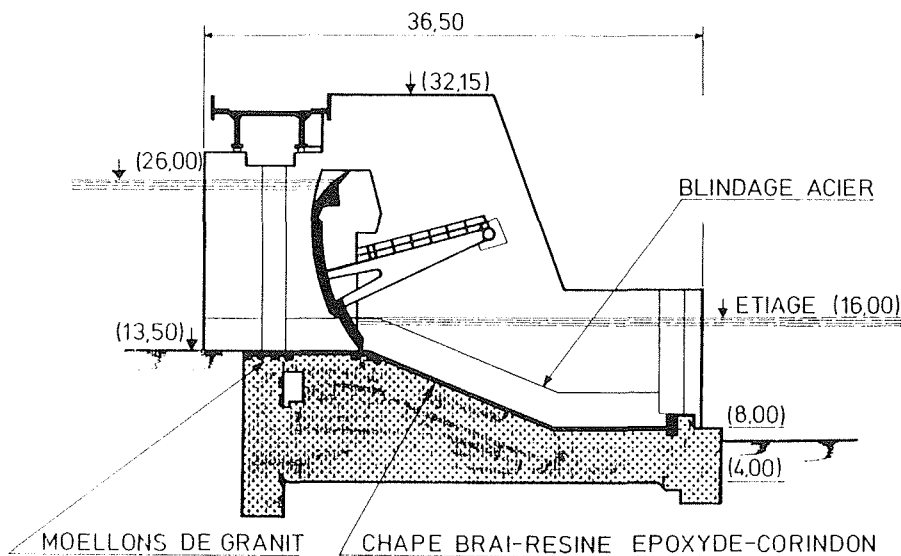


Figure 3 - Coupe du barrage de Villeneuve-lès-Avignon

sensibles à l'humidité que les résines polyuréthanes, de coefficient de retrait trois fois moins important que les résines polyester, de mise en oeuvre moins délicate que ces dernières et enfin mieux adaptées à nos chantiers de travaux.

Enfin, pour s'atténuer le coût des revêtements lié au prix élevé des résines époxydes, nous avons pensé utiliser un complexe se présentant sous la forme de trois composants :

- résine de base
- brai de houille associé à un durcisseur
- corindon

2.3.2. Composition des chapes en brai-résine époxyde-corindon

a) Pourcentage optimal de brai

Le dosage optimal de brai découle des essais d'abrasion réalisés sur des plaques échantillons en brai-résine époxyde dans lesquelles la masse de brai variait de 30 à 70 % de la masse totale du liant.

L'étude des résultats fait apparaître que pour un dosage en brai compris entre 30 et 50 %, l'usure ne varie plus de façon sensible.

La composition en masse du liant "brai-résine époxyde" retenue est la suivante :

- résine 50 %
- brai de houille 43 %
- durcisseur 7 %

b) Granulats

Compte tenu des études réalisées antérieurement sur les chapes en ciment-corindon d'une part et du pouvoir mouillant de la résine très supérieur à celui du ciment d'autre part, la composition granulométrique du corindon est la suivante :

- éléments 0,2 - 2 mm : 20 %
- éléments 2 - 5 mm : 80 %

c) Dosage en liant

Le dosage en liant "brai-résine époxyde" découle des essais d'abrasion réalisés sur des plaques échantillons de chape en brai-résine époxyde-corindon.

Les essais font apparaître que la résistance à l'usure d'une telle chape est équivalente à celle d'un granit de bonne qualité avec une masse de liant égale à 10 % de celle du corindon. Cependant, pour des raisons d'enrobage satisfaisant des éléments solides et de maniabilité du mortier, ce pourcentage a été arrêté à 12 %.

d) Epaisseur de la chape

La résistance à l'usure par abrasion de la chape en brai-résine époxyde-corindon étant le double de celle de la chape en ciment-corindon (de 4 cm d'épaisseur) d'une part et, l'adhérence du mortier de résine sur le support étant excellente d'autre part, nous avons admis de mettre en oeuvre une chape de 2 cm d'épaisseur (soit 4 fois le diamètre des plus gros grains).

2.4. Autres protections : le béton de résine sous chape en brai-résine époxyde-corindon (Fig. 4)

Pour libérer les chantiers de barrage des difficultés d'approvisionnement et de mise en oeuvre des protections en moellons de granit dans les zones les plus sollicitées, la Compagnie a pensé étudier un béton de résine de remplacement.

Les études et essais réalisés avec des résines époxydes et des granulats naturels ont abouti à un béton de résine dont la résistance à l'usure s'apparente à celle d'un granit de qualité médiocre qui, renforcé en surface par une chape en brai-résine époxyde-corindon, constitue une protection équivalente à celle d'un bon granit. Ce béton, disposé en épaisseur de 13 cm sous chape en brai-résine époxyde-corindon de 2 cm, présente en outre une excellente adhérence sur le support en béton armé des radiers de barrages, une mise en oeuvre bien adaptée aux chantiers de grands travaux et des possibilités de réparation en cours d'exploitation, associées à un coût inférieur à celui des protections en granit.

La composition de ce béton est la suivante pour un mètre cube mis en oeuvre :

- gravillons 5/15 (pris sur le site) 1 200 kg
- sable 1,25/2,5 } étuvés livrés en 600 kg
- sable 0,15/0,3 } sacs sur le site 300 kg
- résine époxyde 220 kg

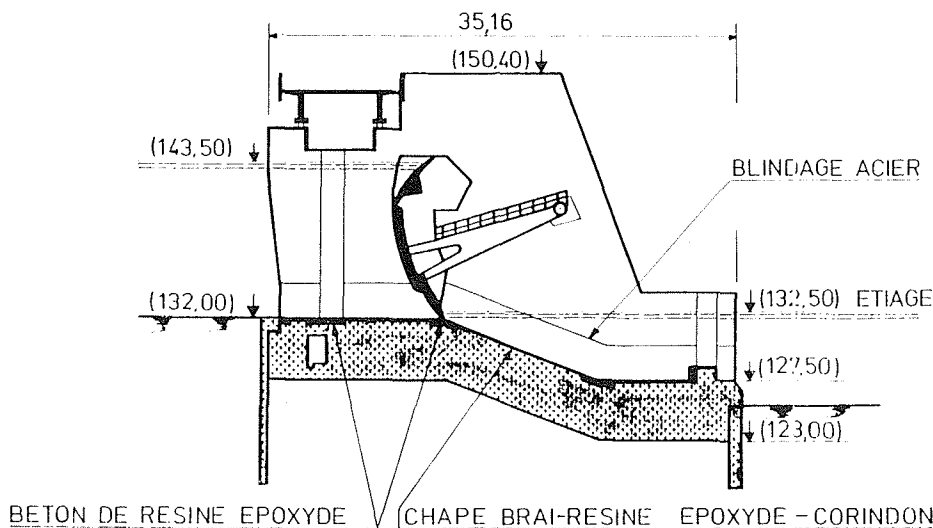


Figure 4 - Coupe du barrage de Saint-Pierre de Boeuf

3. Coût comparé des protections

3.1. Prix unitaires des revêtements

Les dernières protections de surfaces réalisées en moellons de granit datent de 1972. L'étude faite à cette époque faisait apparaître des prix du mètre carré de revêtement, établis en valeur relative par rapport à celui de la protection en moellons de granit, de l'ordre de :

- 60 % pour le béton de résine de 15 cm d'épaisseur
- 30 % pour la chape en brai-résine époxyde-corindon
- 20 % pour la chape en ciment-corindon

3.2. Importance des protections sur le coût des travaux de génie civil des barrages

L'étude réalisée pour le barrage de St-Pierre de Boeuf (chute du Péage de Roussillon mise en eau en 1977) en appliquant les prix unitaires précédents à la surface totale des radiers faisait apparaître les montants suivants établis en valeur relative par rapport à une protection de radier complète en moellons de granit :

- protection tout granit 100 %
- protection du type Vallabrègues :
granit + chape ciment-corindon 60 %
- protection du type Villeneuve :
granit + chape brai-résine époxyde-corindon 48 %
- protection du type St-Pierre de Boeuf :
béton de résine + chape brai-résine époxyde-corindon 36 %

La protection la moins coûteuse retenue pour le barrage de St-Pierre de Boeuf représente 8 % environ du montant des travaux de génie civil de l'ouvrage (fig. 4).

4. Dispositifs d'essais

Les dispositifs d'essais mis au point et utilisés par la Compagnie visent à reproduire en laboratoire les

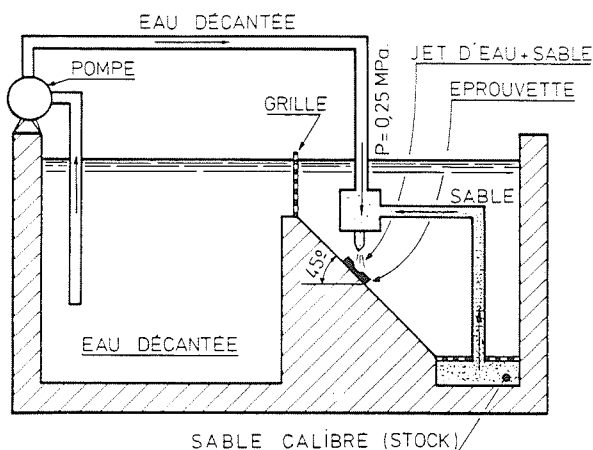


Figure 5 - Essai d'usure - Schéma du dispositif

- Temps de l'essai sur chaque éprouvette = 75 min.
- Volumes des empreintes :
 - . V_0 : sur éprouvette témoin (verre)
 - . V : sur éprouvette matériau testé.
- Indice d'usure : $I = \frac{V}{V_0}$

conditions d'abrasion sous l'eau et de chocs rencontrés dans les ouvrages hydrauliques.

4.1. Test d'usure par abrasion

Ce dispositif, défini sur la figure 5, permet d'apprécier la résistance à l'usure par abrasion du matériau testé sous la forme d'un indice

$$I = \frac{V}{V_0}$$

où V et V_0 sont les volumes des empreintes mesurées sur les éprouvettes respectives du matériau testé et du matériau témoin (le verre) soumis successivement durant 75 minutes à l'action d'un jet d'eau et de sable calibré sous une incidence de 45° .

Le tableau I précise les indices d'usure de quelques revêtements courants.

Tableau I. - Tests d'usure par abrasion et par chocs

Matériaux	Indice d'usure par abrasion	Essai de chocs (volume de l'empreinte) en cm ³
Bétons divers en ciment C.P.A.	de 1,20 à 2,00	110 à 150
Calcaires durs	de 1,20 à 1,40	-
VERRE (matériau témoin)	1	-
Mortier en ciment-corindon	de 0,80 à 1,20	destruction totale
Béton de résine époxyde	de 0,80 à 1,00	20
Granits de Bretagne	de 0,50 à 0,80	-
Granits du Massif Central	de 0,35 à 0,50	-
Mortier en brai-résine époxyde-corindon	de 0,4 à 0,5	40
Résines époxydes pures	0,22	40
Acier AM N 132-61	0,04	-
Fonte FUVÉ 4	de 0,02 à 0,03	-
Corindon (en bloc)	traces non mesurables	-
Caoutchouc naturel vulcanisé	traces non mesurables	-

4.2. Test d'usure par chocs

Ce dispositif défini sur la figure 6, permet d'apprécier la résistance aux chocs du matériau testé en mesurant le volume de l'empreinte laissée sur le matériau testé soumis à l'action d'une boule métallique de 1 kilogramme de masse tombant 2 700 fois d'une hauteur de 1 m.

Le tableau I précise le volume des empreintes laissées sur les éprouvettes soumises à l'essai de chocs.

5. Mise en œuvre et contrôle des revêtements en résine synthétique

L'efficacité de la protection des surfaces est assujettie aux modalités de réalisation les plus rigoureuses.

Dans ce but, la mise en œuvre de cette protection, confié à des spécialistes, comporte :

- la préparation du support en béton de 21 jours d'âge, comprenant :

- . l'élimination des éléments non adhérents (laitance, nids de cailloux) par rabotage ou bouchardage.
- . le reflachage des creux importants au mortier de résine
- . le sablage
- . le dépoussiérage à l'aspirateur industriel
- . le séchage éventuel.

– l'imprégnation du support, à l'avancement, à la brosse ou par pulvérisation, sans excès, à raison de 200 grammes par mètre carré de résine pure fluidifiée par 10 % maximum de solvant approprié

– la fabrication du mortier de résine dans un malaxeur de 100 litres à axe vertical et cuve amovible permettant une mise en place en continu

– la mise en place du mortier par lés successifs ou alternés, suivant le cas, de 2 cm d'épaisseur

– le serrage du mortier à l'aide du rouleau lisse lesté, à la taloche ou au vibro-compacteur.

D'une façon générale, les zones traitées sont utilisables dans les 24 heures suivant la réalisation de la protection.

5.1. Contrôles des revêtements

Indispensables à l'appréciation rigoureuse de la qualité des protections réalisées, ces contrôles sont effectués :

– sur les produits (liants et agrégats) par analyse de la résine (composition, viscosité, pot-life) et des matériaux (nature, granulométrie, propreté et humidité),

– sur le revêtement en place (mortier) par examen d'éléments carottés prélevés par extraction mesurée (adhérence de la chape sur le support en béton hydraulique, épaisseur du revêtement, densité en place et qualité du compactage).

6. Evolution et développement des protections

L'analyse des résultats des essais de chocs récapitulés dans le tableau I fait apparaître deux familles de protection :

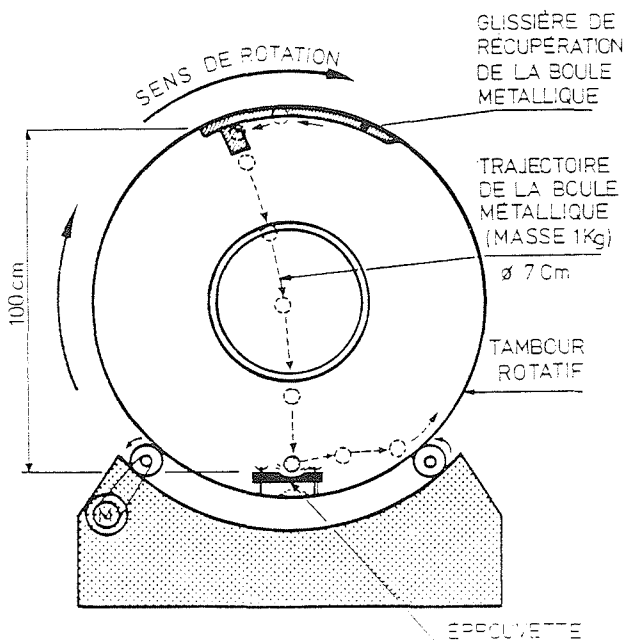


Figure 6 – Essai de chocs – Schéma du dispositif

- Durée de l'essai : 3 heures
- Nombre de chocs : 2700
- L'essai consiste à mesurer le volume de l'empreinte sur l'éprouvette.

– la famille des "formules rigides" caractérisée par une désagrégation des éléments en surface sous l'effet des chocs, la cohésion et l'adhérence restant inchangées en dehors de cette zone,

– la famille des "formules souples" caractérisée par l'insensibilité aux chocs en surface du revêtement, mais susceptible de subir une décohésion interne plus ou moins profonde selon l'écart entre les valeurs des coefficients d'élasticité du liant et des granulats.

Avec l'apparition des résines époxy-uréthanes et leur évolution vers une moindre sensibilité à l'humidité et aux chocs, les recherches de la Compagnie se sont orientées vers des protections de surface appartenant

Tableau II. – Famille des "formules souples"

Formules		Résultats d'essais		
Désignation	Composition pour 1 m ³ de mortier	Adhérence	Usure par abrasion	Usure par chocs (volume de l'empreinte)
Résine époxy-uréthane-sable	Résine : 320 kg Sable : 0,4-1,2 mm 450 kg Sable : 4-6 mm 1400 kg	> 2 MPa	0,45	Perte de cohésion sur la moitié supérieure de l'épaisseur de la chape
Résine époxy-uréthane-Corindon fin	Résine : 320 kg Corindon 0,1-2 mm : 550 kg Corindon 0,2-2 mm : 2050 kg	> 2 MPa	0,70	Destruction superficielle de la chape
Résine époxy-uréthane-hématites	Résine : 320 kg Hématites angulaires : 880 kg Hématites rondes : 4050 kg 1,7-2,4 mm	> 2 MPa	0,06	Pas d'empreinte mesurable Aucun dommage

à la famille des "formules souples" utilisant des granulats naturels (gravier) ou industriels (hématites).

Des formules testées, dont la nature, la composition et les résultats d'essais apparaissent dans le tableau II, il ressort que seul le mortier en résine époxy-uréthane-hématites satisfait à l'ensemble des critères retenus pour les ouvrages construits par la Compagnie sur le Rhône : abrasion, chocs, adhérence.

Cette dernière formulation en cours d'expérimentation sur nos deux derniers barrages du Haut-Rhône, constitue une protection à hautes performances dont le coût, plus élevé que celui de la chape en mortier de brai-résine époxyde-corindon, devrait limiter son emploi sur les zones des ouvrages les plus sollicitées par les phénomènes d'usure.

7. Conclusions

Tous les types de protection en résine synthétique que nous venons d'examiner, présentent les caractéristiques suivantes :

- excellente adhérence sur support en béton hydraulique sec et cohésion très supérieure à celle de ce dernier,
- mise en oeuvre aisée et bien adaptée aux chantiers de grands travaux : suppression de phases intermédiaires et des aciers de couture correspondants,
- rapidité de mise à disposition des zones protégées,
- réparation aisée en cas de dégradation en cours d'exploitation.

Par ailleurs, de l'analyse des propriétés particulières à chacune des formules étudiées, il ressort que :

- le mortier en brai-résine époxyde-corindon paraît mieux adapté pour la protection des surfaces d'ouvrages soumis à l'action des matériaux de faibles dimensions en suspension dans l'eau (sables et petits matériaux de carrière par exemple),

- le béton de résine sous chape en mortier de brai-résine époxyde-corindon paraît mieux convenir pour une protection de masse autour des éléments d'ouvrages plus sollicités par les phénomènes hydrauliques (seuils des vannes de barrage par exemple),

- le mortier en résine époxy-uréthane-hématites devrait être réservé à la protection des surfaces d'ouvrages soumis à des chocs fréquents.

Il importe de souligner que cette diversification des formules de protection est propre à la conception et à l'exploitation des barrages mobiles construits sur le Rhône, par la Compagnie et que le choix du type de protection reste subordonné à un certain nombre de paramètres particuliers à chacun des ouvrages, parmi lesquels nous pouvons noter :

- la fonction et les conditions d'exploitation de l'ouvrage à protéger : débit, vitesse, énergie à dissiper,
- les sollicitations éprouvant l'ouvrage : débit solide, granulométrie des éléments chariés, cavitation,
- l'analyse des effets sollicitant les zones à protéger : batillage, immersion alternée, variations climatiques.

Enfin, nous noterons que, quels que soient le soin apporté à l'analyse des phénomènes et les types de revêtement retenus, l'efficacité de la protection demeure liée à la qualité des modalités de réalisation les plus rigoureuses.

Discussion

Président : M. H. de MAUBLANC

La communication, accompagnée de diapositives, est présentée par M. LLOPIS (pour la partie concernant l'évolution des différents revêtements anti-usure utilisés sur les barrages

de Montélimar, Vallabregues, Villeneuve et St-Pierre de Boeuf) et par M. D'ANGELO (en ce qui concerne les essais : mise au point d'un compromis entre adhérence, abrasion et chocs).

