

Comportement des géomembranes dans les barrages français en remblai

Paul Royet^a, Hugues Girard^b, Daniel Poulain^b et Claude Tisserand^c

Dans le domaine de l'étanchéité des barrages par géomembranes, la France a été un des pays précurseurs puisque les premières applications remontent à plus de trente années. En s'appuyant sur cette expérience et sur l'examen du comportement d'ouvrages français, cet article présente les enseignements qui peuvent être tirés, tant du point de vue de la qualité de l'étanchéité obtenue que de la tenue au vieillissement de ces dispositifs d'étanchéité mettant en œuvre des matériaux géosynthétiques.

Sur le plan international, la France a été un des pays précurseurs pour l'utilisation des géomembranes en étanchéité de barrages. De plus, des membranes de divers types y ont été employées, ce qui rend d'autant plus riche le retour d'expérience que l'on peut en tirer. C'est l'objet de cet article que de présenter les enseignements de plus de trente années de pratique française dans ce domaine, en se limitant aux barrages en remblai.

La première application d'une géomembrane pour l'étanchéité d'un barrage remonte à 1968 : il s'agit du barrage de Miel, remblai de 13 m de hauteur, étanché par une membrane Butyl protégée. Puis, pendant les années 1973 à 1977, ont été réalisés, sous l'impulsion du CTGREF¹ et de la DDAF² du Var, six petits barrages de 6 à 17 m de hauteur, étanchés par géomembrane bitumineuse manufacturée ou réalisée *in situ*, et dans tous les cas non protégée. Le retour d'expérience de ces ouvrages a été développé lors du colloque CFGB³-CFG⁴ de 1996 (Alonso *et al.*, 1996).

La première expérience où l'on voit se développer le concept de DEG (dispositif d'étanchéité par géomembrane) avec couche support, complexe d'étanchéité et couche de protection, remonte à 1975 au barrage de Cournauron (Allier), de 14 m de hauteur. Quant au premier projet concernant un barrage de plus de 20 m de hauteur et donc présenté au CTPB, il s'agit du barrage de l'Ospédale (Corse) conçu par l'OEHC⁵ et achevé en 1979. Cet

ouvrage est en quelque sorte le « doyen » des grands barrages de ce type, une sorte de « référence ». Mais bien d'autres sont venus compléter l'expérience, au point que le choix d'une étanchéité mince par géomembrane concerne environ 15 % des grands barrages en remblai construits en France ces deux dernières décennies. Pour ne citer que les plus importants, mentionnons (tableau 1, p. 4) :

- Mas d'Armand (Lozère) en 1980 ;
- Rouffiac également dénommé Lanouaille (Dordogne) en 1983 ;
- Codole (Corse) en 1984 ;
- Aubrac (Aveyron) en 1986 ;
- Valence d'Albi (Tarn) en 1988 ;
- Mauriac (Cantal) 1989 ;
- La Madone (Rhône) en 1990 ;
- Figari (Corse) en 1991 ;
- Borfloc'h (Morbihan) en 1993 ;
- Empurany (Ardèche) en 1995 ;
- Selvet (Aveyron) en 1996 ;
- Ortolò (Corse) en 1996 ;
- et enfin, la Galaube (Aude) en 2000.

Parmi tous les barrages listés ci-dessus, seul le barrage d'Aubrac a fait l'objet de prélèvements *in situ* avec essais en laboratoire permettant de mesurer le vieillissement de la géomembrane au travers de l'évolution de ses caractéristiques mécaniques et physico-chimiques. Les résultats en sont rapportés au chapitre suivant. On espère pouvoir réaliser la même opération au barrage de Codole à l'occasion de sa prochaine inspection décennale, car là

1. Centre technique du génie rural des eaux et des forêts.

2. Direction départementale de l'agriculture et de la forêt.

3. Comité français des grands barrages.

4. Comité français des géosynthétiques.

5. Office d'équipement hydraulique de la Corse.

Les contacts

a. Cemagref, UR
Ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation,
Le Tholonet, BP 31
13612 Aix-en-Provence
b. Cemagref, UR
Ouvrages et réseaux hydrauliques, 50,
avenue de Verdun,
33612 Cestas Cedex
c. OEHC, Avenue Paul
Giacobbi, BP 678,
20601 Bastia Cedex

Nom du barrage	Année d'achèvement	Hauteur (m)	Fruit du talus amont	Type de géomembrane	Type de protection
Miel (19)	1968	13	2,5	Butyl 10/10	Graviers + enrochements
Cournauron (03)	1975	14	1,6	Butyl 20/10	Dallettes béton
Ospédale (2A)	1979	26	1,7	Bitumineuse 5 mm	Pavés autobloquants
Mas d'Armand (48)	1980	19	1,6	Bitumineuse 5 mm	Pavés collés sur géotextile
Rouffiac (24)	1983	12,6	2,5	Bitumineuse 4 mm	Graviers + enrochements
Codole (2B)	1984	28	1,7	PVC 20/10	Dalles béton armé
Aubrac (12)	1986	14	2,5	PVC 12/10	Graviers + enrochements
Valence d'Albi (81)	1988	15	2	Bitumineuse 4 mm	Géomembrane interne au remblai
Mauriac (15)	1989	14,5	1,7	Bitumineuse 3,9 mm	Pavés fixés sur câble inox
Madone (69)	1990	18	2,3	PVC 20/10	Dalles de béton de fibres
Figari (2A)	1991	35	1,7	PVC 20/10	Dalles de béton de fibres
Borfloc'h (56)	1993	19	1,7	Bitumineuse 4 mm	Dalles béton armé
Empurany (07)	1995	19,5	1,7	PVC 10/10	Béton projeté
Ortolo (2B)	1996	37	1,7	Bitumineuse 5 mm	Dalles de béton de fibres
Selvet	1996	18	2,5	Bitumineuse 4 mm	Grave + tout venant rocheux
Galaube (11)	2000	43	2	Bitumineuse 5 mm	Dalles de béton de fibres

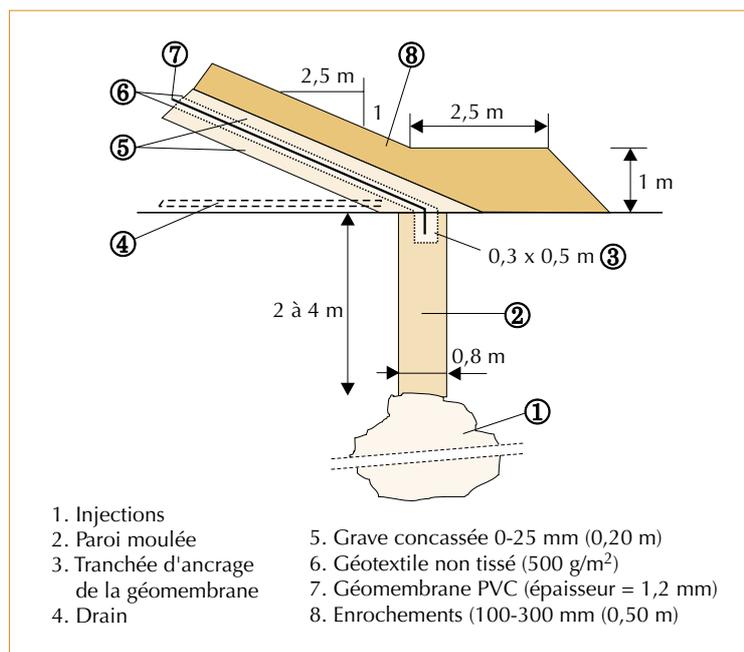
▲ Tableau 1 – Principales caractéristiques des grands barrages français étanchés par un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG).

aussi, des fenêtres ont été aménagées lors de la construction pour permettre des prélèvements *in situ*.

Sur les autres barrages, en l'absence de toute possibilité d'expérimentation sur les géomembranes en place (toutes protégées, donc inaccessibles), le seul critère d'appréciation de l'évolution du dispositif d'étanchéité dans son ensemble, reste la mesure du débit de fuites : c'est ce qui est développé sous le titre « Suivi des fuites sur les barrages auscultés », pour les barrages où l'on dispose de ces données d'auscultation.

Enfin, certains barrages, heureusement de taille plus modeste, ne font pas l'objet d'un suivi formalisé et on ne dispose donc que des observations à l'occasion d'inspections visuelles pour juger du vieillissement de l'ouvrage, de façon certes bien incomplète. Ces informations qualitatives font l'objet du titre « Barrages non auscultés ».

▼ Figure 1 – Barrage d'Aubrac – Coupe schématique du DEG.



Suivi par des essais en laboratoire (barrage d'Aubrac)

Description de l'ouvrage et de son étanchéité (figure 1)

Le barrage d'Aubrac est un ouvrage en remblai construit en 1985-1986 de 14 m de hauteur et permettant de stocker 1 260 000 m³ d'eau destinée à l'alimentation en eau potable. C'est un ouvrage en remblai homogène gravo-sableux, construit au sud du Massif Central en moyenne montagne (altitude 1300 m) sur un substratum basalitique. L'étanchéité du barrage est assurée par une géomembrane mise en place sur le parement amont de l'ouvrage et prolongée en fondation par une paroi moulée de quelques mètres de hauteur, recoupant l'horizon gravo-sableux superficiel surmontant un rideau d'injection dans le basalte du substratum.

Le dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) est constitué des éléments successifs suivants, mis en place sur le parement amont de fruit⁶ 2,5 :

6. Le fruit d'un talus est le rapport entre la longueur mesurée horizontalement et la hauteur (L/H). C'est également la cotangente de l'angle que fait le talus avec l'horizontale. Un fruit de 0 correspond à un talus vertical.

- couche drainante de 20 cm d'épaisseur en grave 0-25 mm ;
- géotextile non tissé (500 g/m²) ;
- géomembrane PVC-P de 1,2 mm d'épaisseur ;
- géotextile non tissé (500 g/m²) ;
- couche de protection de 20 cm d'épaisseur en grave 0-25 mm ;
- couche de protection de 50 cm d'épaisseur en enrochement 100-300 mm.

Le raccordement au pied du talus avec le rideau d'étanchéité de la fondation a été assuré par immersion de la géomembrane dans une tranchée étroite réalisée dans la paroi moulée et remplie d'un coulis bentonite-ciment. Sous la géomembrane à la base de la couche drainante, un drain de pied permet de récupérer les éventuelles venues d'eau et ainsi éviter les sous pressions ; ce drain est divisé en tronçons, chacun relié à un collecteur assurant l'évacuation des eaux dans un caniveau situé au pied aval du barrage. En tête de talus le complexe géosynthétique est ancré dans une petite tranchée de 30 cm de profondeur ; cet ancrage n'a pas pour objet d'assurer la stabilité du DEG, il a servi à maintenir les géosynthétiques lors de leur mise en place.

La mise en œuvre des couches de protection (grave + enrochements) a été réalisée depuis le pied du talus à l'aide d'un chargeur sur chenilles et d'une pelle hydraulique sur chenilles (poids respectifs de 10 et 15 tonnes) ; ces engins n'ont pas eu de problème pour rouler sur les couches de matériaux mises à l'avancement sur une pente de 2,5/1 ; des essais préalables avaient permis de vérifier que la circulation de ces engins, même sur la première couche de 20 cm d'épaisseur, n'entraînait pas de poinçonnement de la géomembrane. Notons qu'après l'incident de glissement présenté ci-après, la circulation ne s'est effectuée que sur la couche d'enrochement butée en pied.

Cet incident survenu pendant le chantier est un glissement au niveau de l'interface géomembrane-géotextile inférieur qui est intervenu sur une surface de 1 000 m² environ lors de la mise en place des couches de protection. Ce glissement a eu lieu bien que l'angle de frottement à l'interface considérée (mesuré à la boîte de cisaillement) soit supérieur à l'angle de la pente du parement amont ; les explications de ce glissement, alors avancées, sont d'une part l'effet dynamique d'engins circulant sur la couche de protection (par exemple arrêt brutal en descendant) et la présence d'une partie légèrement plus pentue du parement amont au pied rive droite de la passerelle. Cet incident est à l'origine

du développement de l'essai de frottement au plan incliné qui permet de tester les interfaces sous faible contrainte ; les essais à la boîte de cisaillement (contraintes de quelques centaines de kPa) conduisent dans certains cas à surestimer l'angle de frottement aux interfaces entre géosynthétiques (Girard *et al.*, 1990).

Évolution de la géomembrane

Le comportement du barrage d'Aubrac, quinze ans après sa mise en service, est tout à fait satisfaisant. D'une manière générale, les débits de drainage mesurés de manière globale (drains provenant de la géomembrane + drainage du contact remblai-fondation) dans le caniveau bétonné au pied aval de l'ouvrage ne présentent pas d'évolution notable. La valeur totale des débits de drainage est faible, de l'ordre de 1 l/s.

Ce faible débit de drainage est à corrélérer au bon état constaté de la géomembrane. Il est en effet possible, sur cet ouvrage, de suivre le comportement dans le temps de cette géomembrane grâce à la mise en place de trois plots témoins sur le versant rive gauche à trois niveaux différents :

- en fond de retenue : zone immergée ;
- à mi-pente : zone de marnage ;
- en haut de pente : zone au-dessus du niveau normal des eaux (NNE).

Chacun des plots est constitué de plusieurs échantillons de 2 m² mis en place dans les mêmes conditions (couche support, géotextiles antipoinçonnant et couche de protection) que sur le parement amont du barrage. Ces échantillons peuvent être prélevés périodiquement (notamment lors des vidanges décennales) pour réalisation d'essais en laboratoire caractérisant l'évolution de la géomembrane. Par ailleurs, des échantillons témoins sont stockés à l'abri de la lumière dans un local du propriétaire, afin de pouvoir réaliser sur ceux-ci les mêmes essais, et comparer les résultats avec les échantillons du site.

Des prélèvements (Photo 1, p. 6) ont été effectués lors de vidanges de la retenue en 1989, 1993 et 2000 soit respectivement trois, sept et quatorze ans après la construction. La vidange de 1993 ayant été partielle, aucun échantillon de la zone témoin du bas, restée sous l'eau, n'a pu être prélevé à cette date. Lors de chacun de ces prélèvements, en plus des mesures d'épaisseur et de masse surfacique, des essais mécaniques (tractions uni-axiale et multi-

7. L'essai de traction multi-axiale consiste à appliquer une pression uniforme sur un échantillon circulaire de géomembrane fixé à sa périphérie. On mesure la déformation axiale de la membrane en fonction de la pression appliquée.



► Photo 1 – Prélèvement d'un échantillon.

axiale) et la détermination du taux de plastifiant ont été notamment réalisés ; les résultats obtenus sur les échantillons prélevés en 2000 figurent dans le tableau 2.

Les résultats de ces essais réalisés sur les échantillons prélevés en 2000 nous permettent de constater que la géomembrane a gardé des caractéristiques tout à fait satisfaisantes, quatorze ans après sa mise en place, ceci quelle que soit la zone de prélèvement. De manière plus détaillée, les mesures effectuées montrent une tendance au vieillissement légèrement plus rapide lorsqu'on passe successivement de la zone toujours immergée à la zone de marnage, et surtout à la zone toujours hors-d'eau. Cette constatation est notamment illustrée par la résistance à la traction à 15 % de déformation qui croit du bas en haut du versant ; la déformation à la

▼ Tableau 2 – Résultats des essais sur échantillons de géomembrane prélevés au barrage d'Aubrac en novembre 2000.

Caractéristiques	Échantillons Stockés	Bas	Mi-talus	Haut
Plastifiant (%)	31,6	31,4	31,5	30,7
Épaisseur (mm)	1,22	1,24	1,28	1,24
Masse surfacique (g/m ²)	1523	1561	1586	1558
Traction*				
Résistance à 15 %	3,4	3,2	3,5	3,6
Résistance à la rupture (kN/m)	21,7	21,4	21,8	21,5
Déformation à la rupture (%)	254	266	265	245
Traction multi-axiale (éclatométrie)				
Pression maximum (kPa)	298	305	312	330
Hauteur à la pression max. (mm)	65	62	65	58
Pliage à froid (° C) – norme DIN53361	-35	-35	-32,5	-25

* : sens production.

rupture varie logiquement en sens inverse, montrant ainsi une légère rigidification de la géomembrane croissante avec le temps passé hors d'eau. De la même manière, l'essai de traction multi-axiale⁷ (figure 2) montre une augmentation de la pression maximale et une diminution de la déformation à la rupture lorsqu'on teste respectivement les échantillons bas, mi-talus et haut. L'essai de pliage à froid confirme cette tendance à la rigidification des échantillons situés au-dessus du plan d'eau.

La mesure du taux de plastifiant en 2000 montre que cette rigidification des échantillons prélevés en partie haute est notamment due à une perte de plastifiant légèrement plus importante dans cette zone. Ceci pourrait résulter de la présence de matières organiques et de nombreuses racines et/ou éventuellement des variations des conditions climatiques qui en dehors de la zone immergée sont assez sévères dans cette zone d'altitude moyenne.

Dans le cas présent, c'est également la mesure du taux de plastifiant qui a permis de suivre l'évolution de la géomembrane depuis sa mise en place (figure 3) ; en effet les procédures et normes utilisées pour la réalisation des essais mécaniques ont évolué entre les différents prélèvements, ce qui empêche de faire une comparaison fiable dans ce contexte où la variation dans le temps est faible. Malheureusement, la mesure du taux de plastifiant n'a pas été réalisée lors de la mise en œuvre ; toutefois on peut retenir une valeur initiale correspondant à la référence retenue habituellement pour ce type de produit, qui est de 34 à 35%. La figure 3 met en évidence d'une part, une perte en plastifiant plus importante dans la zone toujours hors d'eau et d'autre part, une tendance à la stabilisation du taux de plastifiant qui a moins diminué au cours des sept dernières années que pendant les quatre précédentes. Surtout, on retiendra que quelle que soit la zone de prélèvement, ce taux reste supérieur à 30 % ; la géomembrane garde donc une bonne souplesse.

Les essais réalisés ont permis, d'une part, de constater un bon comportement de la géomembrane du barrage d'Aubrac et d'autre part, de mettre en évidence une légère différence de vitesse de vieillissement de la géomembrane selon son emplacement dans l'ouvrage. Les mesures réalisées périodiquement montrent également que ce vieillissement est lent et qu'il a tendance à se ralentir, ce qui est très favorable pour la longévité de l'étanchéité de l'ouvrage. Cet exemple du suivi de la

géomembrane du barrage d'Aubrac nous montre tout l'intérêt de la mise en place de zones témoins qui devraient être systématiquement prévues sur tous les ouvrages importants.

Suivi des fuites sur les barrages auscultés

Les graphiques présentés ci-après appellent les commentaires suivants :

- les valeurs indiquées sont des valeurs cumulées, soit parce que les débits partiels sont collectés dans un regard unique, soit parce qu'ils sont totalisés ;
- on a systématiquement effacé les « pointes » de débit, exclusivement imputables à la pluviométrie ;
- les valeurs indiquées sont les maxima observés dans l'année, à barrage plein.

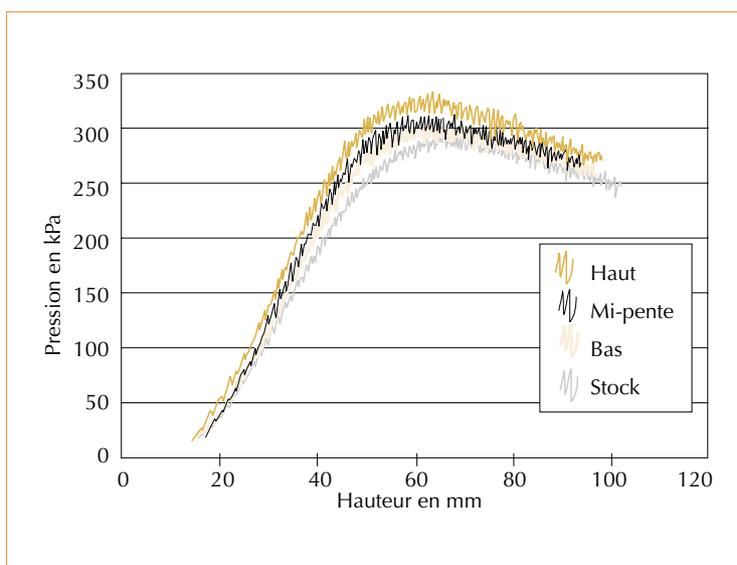
Ospédale

Construit de 1976 à 1978, ce barrage en enrochements de 26 m de hauteur a été mis en eau en 1979, ce qui lui donne donc vingt-trois années d'exploitation à ce jour. Son DEG, posé sur un parement de fruit 1,7 (Tisserand, 1996), est constitué par :

- une couche support en enrobé bitumineux à froid, perméable ;
- un géotextile non tissé de masse surfacique 400 g/m² ;
- une géomembrane bitumineuse de 5 mm ;
- un géotextile non tissé de masse surfacique 400 g/m² ;
- une couche de protection de 8 cm, en pavés autobloquants, de 8,5 kg de masse unitaire.

Le graphique des fuites de la figure 4 (p. 8) fait apparaître les évolutions suivantes :

- la première année, le débit de fuite est relativement important (5 l/s) ;
- ce débit est en forte baisse durant les trois années suivantes, sans doute par suite d'un phénomène d'auto-colmatage par des débris végétaux divers (1,2 l/s environ) ;
- en 1983 survient un incident d'importance moyenne : le glissement, suite à une forte tempête, d'une partie de la couche de pavés autobloquants (glissement n'ayant entraîné aucun dégât à la géomembrane). Il s'en suit cependant une légère augmentation du débit de fuite (1,6 l/s environ) ;

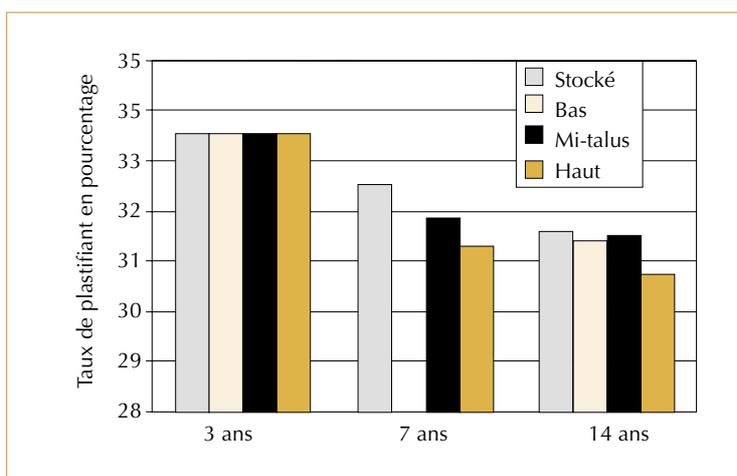


– ce débit reste ensuite constant jusqu'en 1985, date de la première vidange complète, qui a été suivie d'une opération de nettoyage du parement amont et surtout du mur de pied : on observe en 1986, après remise en eau complète, une forte augmentation du débit de fuites (3,4 l/s), que l'on peut imputer sans hésiter à ce nettoyage du mur de pied (ce qui tend à montrer qu'une bonne part du débit de fuite constaté est en fait imputable à des fuites sur ce mur, et non pas à la géomembrane) ;

– ce débit reprend ensuite rapidement son niveau « normal » de l'ordre de 2 à 3 l/s, jusqu'à ce jour, ceci en dépit d'une opération de rehausse du niveau d'exploitation de 80 cm en 1993 et d'une nouvelle vidange totale en 1995 et 1996.

▲ Figure 2 – Essais de traction multi-axiale (éclatométrie) sur les échantillons prélevés en 2000 au barrage d'Aubrac.

▼ Figure 3 – Évolution du taux de plastifiant de la géomembrane du barrage d'Aubrac.



On notera que ce débit, ramené au m^2 de section barrée, est de l'ordre de **2,4 l/h/m²** (valeur à comparer aux autres ouvrages).

En conclusion, on peut considérer que l'état de l'étanchéité par géomembrane est resté excellent, et qu'elle ne suscite aucune inquiétude à ce jour.

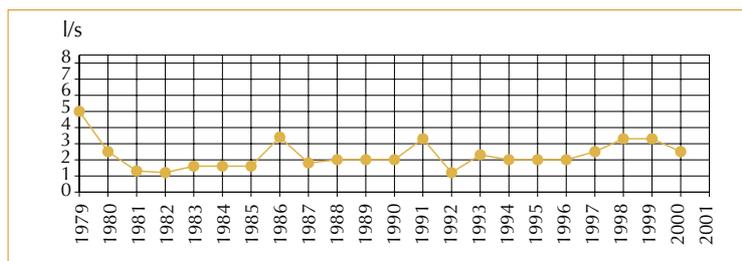
Codole

Construit de 1979 à 1983, cet ouvrage en enrochements de 28 m de hauteur a été mis en eau en 1984, ce qui lui donne dix-sept années d'exploitation à ce jour. Son DEG, posé sur un parement de fruit 1,7, diffère quelque peu de celui de l'Ospédale (Tisserand, 1996) puisqu'il comprend :

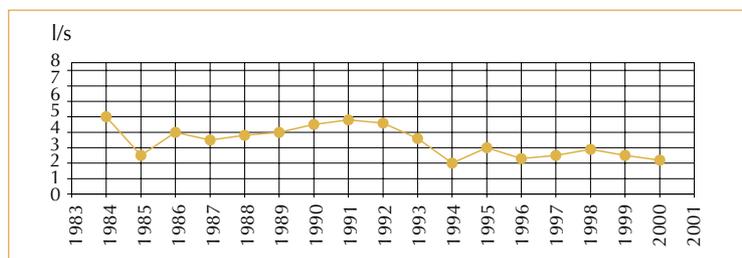
- une couche support identique ;
- une géomembrane en PVC souple de 2 mm, solidaire du géotextile support ;
- une couche de protection de 14 cm, en béton légèrement armé coulé en place (dalles de 5 x 5 m²), posée sur géotextile non tissé de 400 g/m².

Le graphique des débits de fuite de la figure 5 fait apparaître les évolutions suivantes :

- la première année, le débit de fuite est relativement important (5 l/s) alors que le barrage n'est pas plein ;
- l'année suivante, ce débit ne dépasse pas 2,5 l/s, à barrage plein ;



▲ Figure 4 – Débits de fuite observés sur le barrage d'Ospédale entre 1979 et 2000.



▲ Figure 5 – Débits de fuite observés sur le barrage de Codole entre 1984 et 2000.

– puis, de 1986 à nos jours, ce débit fluctue faiblement, entre 2 et 4 l/s, avec une pointe à 4,8 l/s en 1991.

Il est à noter que ce barrage n'a connu aucun incident notable durant et après sa construction. Le débit de fuite, ramené au m^2 de section barrée (cette section est ici très importante : 12 000 m² environ) est de **0,6 à 1,2 l/h/m²**, ce qui est 2 à 4 fois plus faible qu'à l'Ospédale.

En conclusion, on peut considérer que l'état général de cette étanchéité est excellent et n'inspire aucune inquiétude.

Figari

Construit de 1988 à 1990, cet ouvrage en enrochements de 35 m de hauteur a été mis en eau en 1991, ce qui lui donne onze années d'exploitation à ce jour. Son DEG, posé sur un parement de fruit 1,7, diffère un peu de celui de Codole (Tisserand, 1996) en ce qu'il comprend :

- une couche support inchangée, sauf que le géotextile n'est pas solidaire de la géomembrane ;
- une géomembrane en PVC de 2 mm, soudée à la machine et contrôlée après double soudure ;
- une couche de protection en béton armé de fibres polyester, coulé en place sur un géotextile non tissé de 400 g/m².

Le graphique de la figure 6 fait apparaître un débit de fuites particulièrement faible, de l'ordre de 0,5 à 1 l/s, avec une légère tendance à la baisse durant ces dernières années. On peut signaler par ailleurs que ce barrage a connu de sérieuses difficultés durant sa construction (coup de vent ayant emporté une très grande partie de la géomembrane), mais aucun problème depuis sa mise en eau. Le débit de fuite, ramené au m^2 de section barrée, s'établit à moins de **1 l/h/m²**, ce qui est encore plus faible que celui de Codole.

En conclusion, on peut considérer que l'état général de cette étanchéité est excellent à ce jour et n'inspire aucune inquiétude.

Ortolo

Construit de 1994 à 1996, cet ouvrage en enrochements de 37 m de hauteur a connu plusieurs mises en eau intempestives avant d'être terminé. Sa mise en eau contrôlée a eu lieu en 1997, ce qui lui donne six années d'exploitation à ce jour. Son DEG, posé sur un parement de fruit 1,7, s'apparente à l'ensemble de ses prédécesseurs, avec toutefois quelques nuances :

- la couche support est identique ;
- la géomembrane est identique à celle de l'Ospédale, avec des géotextiles posés en indépendance et des contrôles de soudures plus sophistiqués ;
- la couche de protection est du type « Figari » (béton armé de fibres).

Le graphique de la figure 7 fait apparaître un débit de fuite relativement important dès la première mise en eau (7 l/s environ), avec de surcroît une légère tendance à l'augmentation jusqu'à ce jour, ce qui est à l'inverse de ce que l'on observe sur les autres ouvrages.

Il est à noter que cet ouvrage a connu de graves incidents durant sa construction, avec une mise en eau totale et brutale (en une nuit) de l'ouvrage, alors revêtu uniquement de sa couche de protection en enrobé bitumineux perméable, et plus tard l'arrachement d'une partie de la géomembrane à la suite d'un coup de vent, pour ne citer que les plus importants... Il ne fait pas de doute que ces incidents ne sont pas étrangers à ce débit de fuite relativement important, bien que l'on n'ait pas pu observer d'autres désordres consécutifs à ces événements, comme par exemple des tassements anormaux. Une campagne d'investigations poussées, avec destruction ponctuelle de la couche de protection pour inspection de la géomembrane a même été menée, en vain.

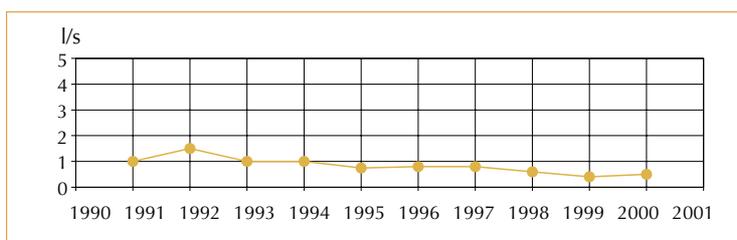
On notera que le débit de fuite, ramené au m² de section barrée, est de l'ordre de **7 l/h/m²**, soit sept fois plus qu'à Figari, et trois fois plus qu'à l'Ospédale.

En conclusion, il faut bien reconnaître que cet ouvrage, le dernier de la série en Corse, n'est pas le plus réussi ! C'est le seul qui à ce jour donne lieu à quelques inquiétudes, ou tout au moins qui nécessite une attention accrue, bien que le débit actuel de fuites reste très en dessous du débit réservé.

Barrage de Mauriac

Destiné à créer un plan d'eau à usage touristique, le barrage de Mauriac est constitué d'un remblai en enrochements compactés de 14,5 m de hauteur au-dessus du terrain naturel. Il est doté d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane sur le parement amont de fruit 1,7 :

- zones de transition 0/500, puis 0/200 mm ;



- couche de forme de 10 cm de grave émulsion ;
- géotextile polyester aiguilleté 260 g/m² ;
- géomembrane bitumineuse armée de 3,9 mm d'épaisseur (6 000 m²);
- géotextile tissé ;
- pavés de béton, retenus par des câbles en acier inox fixés en crête.

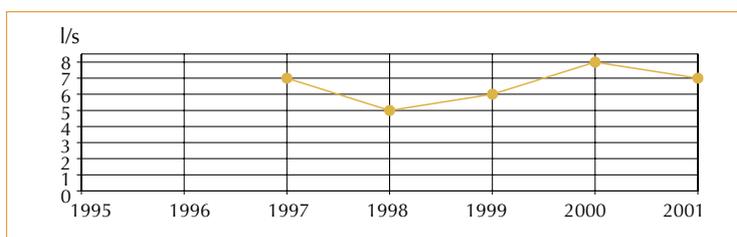
▲ Figure 6 – Des débits de fuite observés sur le barrage de Figari entre 1991 et 2001.

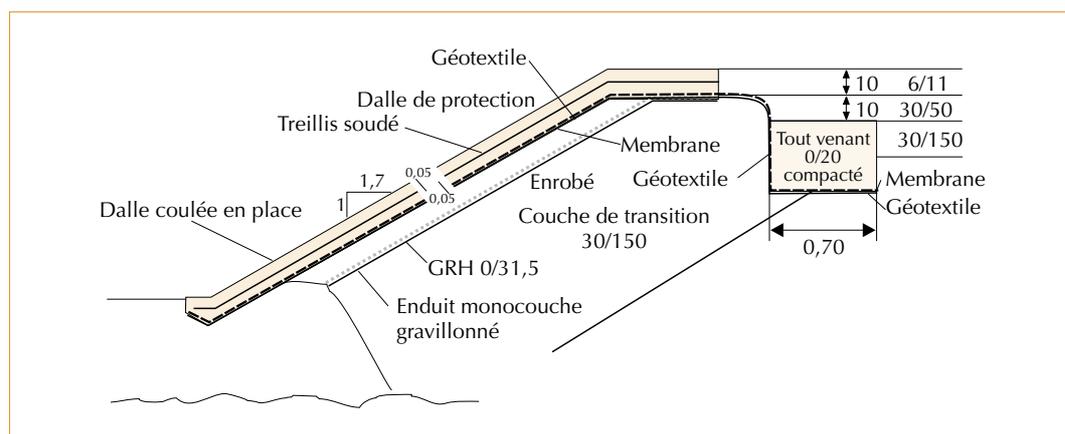
Le plan d'eau étant à niveau pratiquement constant, la protection de la géomembrane n'a été appliquée qu'en partie supérieure de talus sur une bande de 4 m de longueur. Le DEG est ancré en tête dans une tranchée de 0,8 x 0,5 m et en pied dans un parafeuille descendu au rocher étanche, soit jusqu'à 6 m de profondeur.

Construit en 1989, le barrage de Mauriac a été mis en eau fin 1990 puis a subi un cycle complet de vidange remplissage début 1992 afin de s'assurer de son bon comportement. On dispose donc de dix années d'exploitation. La série des mesures de débits de fuite présente malheureusement plusieurs périodes d'interruption. On peut cependant mettre en évidence les évolutions suivantes :

- un débit total de fuite de 3,2 l/s au premier remplissage en 1991 ;
- un débit ramené à environ 2,5 l/s en 1993-1994 ;
- un débit apparemment stabilisé sur la période 1998-2001, à la valeur de 1,5 l/s.

▼ Figure 7 – Débits de fuite observés sur le barrage d'Ortolo entre 1997 et 2001.





► Figure 8 – Barrage de Borfloc'h – Coupe type de l'étanchéité.

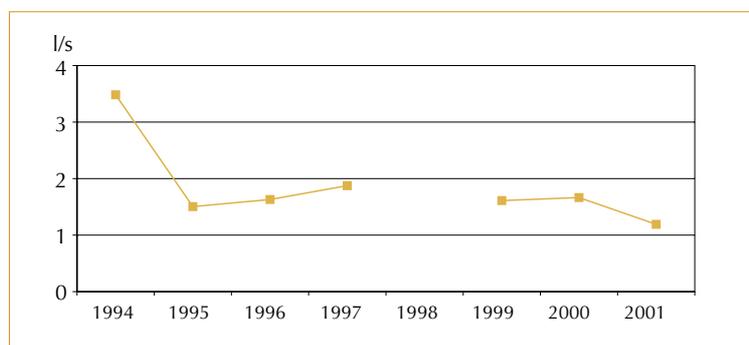
Ramené au m^2 de section barrée, ce débit est de l'ordre de **$0,9 \text{ l/h/m}^2$** , soit un débit spécifique du même ordre que Codole et Figari. Les observations visuelles faites par ailleurs sur le dispositif original de protection de la géomembrane montrent son excellent comportement.

Barrage de Borfloc'h

Destiné à l'alimentation en eau potable de Belle-Île-en-Mer, le barrage de Borfloc'h (figure 8) est constitué d'un remblai en enrochements compactés de 19 m de hauteur au-dessus du terrain naturel. Il est doté d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane sur le parement amont de fruit 1,7 :

- couche de transition 30/150 mm, recouverte en surface d'un 0/31,5 mm ;
- enduit monocouche gravillonné ;
- enrobé drainant épaisseur 5 cm ;
- géomembrane bitumineuse de 4 mm d'épaisseur (4 500 m^2);
- géotextile ;

▼ Figure 9 – Débits de fuite observés sur le barrage de Borfloc'h.



– dalles de béton, armées de treillis soudé (8 cm d'épaisseur).

L'étanchéité se raccorde en fondation sur une poutre périmétrale et se prolonge par un rideau d'injections. Construit en 1992 et 1993, le barrage de Borfloc'h a été mis en eau en 1993 et on dispose donc de neuf années d'exploitation.

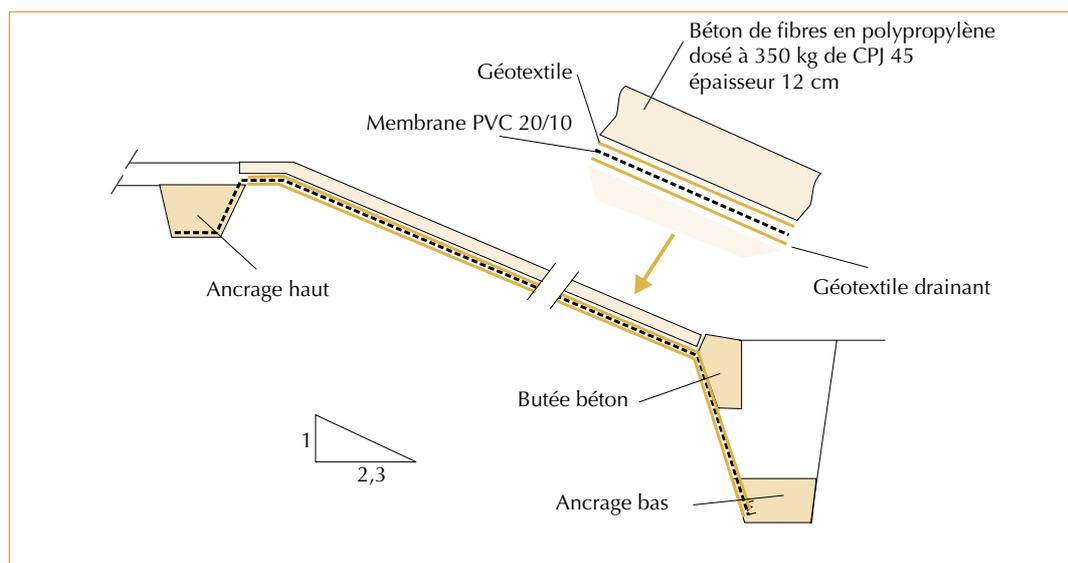
Lors la première mise en eau, des fuites relativement importantes ont été constatées (figure 9), avec un débit retenue pleine de 3,5 l/s pendant la première année d'exploitation. Ce débit a été imputé à un défaut d'étanchéité dans le haut de la rive gauche et au drainage général du plateau dominant la rive gauche. Le débit a été divisé par deux à partir de 1995, mais il n'est pas possible de savoir si cela est dû à un colmatage naturel ou à la modification du dispositif de mesure des fuites qui est intervenue en octobre 1994. Le débit semble stabilisé depuis 1995, voire en légère baisse sur la période récente. Il est fortement lié à la cote du plan d'eau, de même que le piézomètre en haut de rive gauche. Ramené au m^2 de section barrée, ce débit est de l'ordre de **$1,3 \text{ l/h/m}^2$** , soit un débit spécifique du même ordre que Codole et Figari.

On peut donc conclure au bon état général de cette étanchéité, la plus grande part des débits provenant d'un contournement en rive gauche.

Barrage de la Madone

Le barrage de la Madone (Rhône) est destiné à l'irrigation. Il est constitué (figure 10) d'un remblai en gore de 18 m de hauteur au-dessus du terrain naturel, étanché par un DEG de 5 000 m^2 posé sur le parement amont de fruit 2,3 :

- géotextile drainant et antipoinçonnant, posé sur le remblai ;



◀ Figure 10 – Barrage de la Madone : coupe type de l'étanchéité.

- géomembrane PVC 20/10 translucide (contrôle des soudures facilité) ;
- géotextile ;
- dalles de béton de fibres de polypropylène (dimensions 8 m x 6 m, épaisseur 12 cm).

Le DEG se raccorde en pied de remblai dans une bêche remplie au béton ; l'étanchéité se prolonge en fondation par un rideau d'injections. L'ancrage en tête de remblai se fait au moyen d'une tranchée remplie au béton.

Le barrage a été construit en 1990 et mis en eau en fin de cette même année. Des venues d'eau sont apparues en pied aval dès le printemps 1992, provoquant une élévation de la piézométrie en partie inférieure du remblai. Ces venues d'eau ont été attribuées à une alimentation par les rives, soit par une nappe de versant, soit par un contournement au large du voile d'injections. À l'automne 1993, un confortement fut réalisé par recharge en enrochements en pied aval de remblai, posée sur couche filtre en ballast et montant jusqu'à mi-hauteur du talus.

L'inspection visuelle et le suivi topographique ne montrent aucune déformation ou dégradation du parement amont.

Compte tenu des lacunes nombreuses dans la mesure de certains drains, la courbe présentée figure 11 (p. 12) pour le barrage de la Madone n'intègre que la somme des débits des drains centraux qui ont les séries de mesures les plus complètes et qui collectent entre la moitié et les deux

tiers du débit total. Comme pour les autres barrages, il s'agit d'une moyenne annuelle des débits mesurés pour les cotes hautes de retenue. Les valeurs pour les années 1991, 1994 et 1995 sont à prendre avec prudence, car on ne dispose que d'une seule mesure. Sur les onze années d'exploitation, après une baisse rapide au jeune âge, on constate une tendance assez régulière à la baisse des débits qui sont passés de 0,32 l/s à 0,2 l/s.

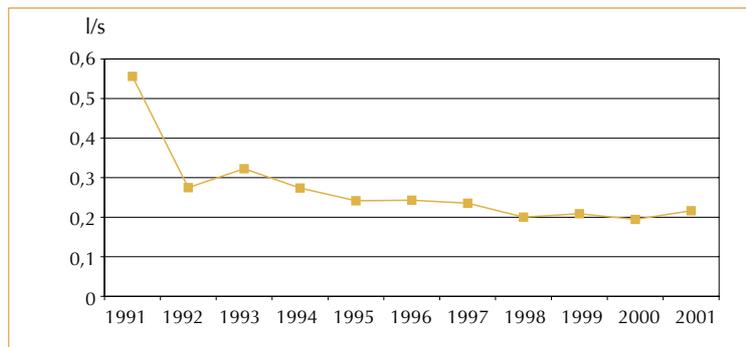
Si l'on considère que les débits des deux drains analysés représentent environ la moitié du débit total des fuites, on aboutit à un débit ramené au m² de section barrée, qui est de l'ordre de **0,3 l/h/m²**. C'est la plus faible des valeurs mesurées sur les barrages auscultés.

En résumé, le comportement du DEG au barrage de la Madone donne toute satisfaction. Les venues d'eau constatées au premier remplissage proviennent très probablement d'une étanchéité insuffisante des rives ou de la fondation ; elles ont été traitées par la construction d'une recharge drainante en pied aval.

Barrage d'Empurany (07)

Destiné à l'irrigation et propriété d'une ASA (Association syndicale autorisée), le barrage d'Empurany est constitué d'un remblai en enrochements de 19,5 m de hauteur maximale sur le terrain naturel avec un DEG d'environ 2 000 m² de surface, posé sur le parement amont de fruit 1,7 :

- béton de peau, percollé à travers les enrochements ;



▲ Figure 11 – Débits de fuite observés sur le barrage de la Madone entre 1991 et 2001.

- géotextile ;
- géomembrane PVC 10/10 ;
- géotextile tissé ;
- béton projeté (de l'ordre de 5 cm).

Le barrage a été construit en 1994 et mis en eau au printemps 1995. Des fuites importantes sont alors apparues en pied de talus aval, ces fuites n'étant que très partiellement interceptées par les drains. À 4 m de la cote de retenue normale, ces fuites, présentes surtout en rive gauche, atteignaient 21 l/s. Fin 1995, le barrage a donc été vidé et on a procédé au dégagement de la couche de protection de la membrane en rive gauche. On a pu observer des déchirures à la liaison entre la membrane et la plinthe périmétrale, suite à des tassements du remblai et à des dispositions inadaptées au niveau de ce raccordement.

Après réparation en rive gauche sur une partie de la longueur, les fuites ont diminué dans un premier temps, puis se sont partiellement reportées sur la rive droite. Des travaux similaires de reprise de la liaison géomembrane/plinthe ont donc été entrepris pendant l'hiver 1999-2000. Depuis lors, le débit de fuite retenue pleine reste malgré tout de l'ordre de 5 à 7 l/s, dont une faible partie seulement sort par les exutoires des drains. Bien que cela ne soit pas très significatif dans le cas de ce barrage où les fuites proviennent essentiellement du raccordement de pied, le débit ramené au m² de section barrée est de l'ordre de **11 l/h/m²**. C'est la plus forte des valeurs mesurées sur les barrages auscultés.

Le barrage d'Empurany souffre manifestement de défauts de conception et de réalisation qui sont liés à un parti pris discutable d'économie, et qui, au final, se traduisent par un comportement globalement peu satisfaisant du DEG.

Barrages non auscultés

Barrage de Miel

Le barrage de Miel semble être la première réalisation en France d'un ouvrage en remblai dont l'étanchéité est uniquement assurée par une géomembrane. Il s'agit d'un ouvrage en terre de 13 m de hauteur maximale, construit en 1968 en Corrèze. Cet ouvrage est constitué d'un remblai en « gore » tout venant ; le dispositif d'étanchéité par géomembrane mis en place sur le parement amont de fruit 2,5 est constitué successivement depuis le remblai des éléments suivants :

- grave drainante roulée (15 cm d'épaisseur) ;
- géomembrane Butyl 10/10 mm ;
- graviers roulés 5/30 mm (20 cm d'épaisseur) ;
- enrochements.

La liaison avec la fondation est assurée par la mise en place de la géomembrane dans une tranchée creusée dans le rocher et remplie de béton. De manière à garantir une meilleure qualité de l'étanchéité, la géomembrane a été pré-assemblée en usine et livrée sur le chantier en trois feuilles seulement. Un réseau de drains constitué de saignées amont-aval remplies de graviers collecte les eaux derrière la géomembrane ; ces drains mis en place au niveau du contact avec la fondation sont espacés d'une dizaine de mètres. La particularité du dispositif d'étanchéité est notamment l'absence de géotextiles de protection de part et d'autre de la géomembrane.

Le comportement de ce barrage est satisfaisant 34 ans après sa construction. Les visites effectuées au cours des années 1990 ont permis de s'assurer que les débits de drainage, barrage plein, restaient faibles (sur les sorties qui ont pu être retrouvées et inspectées). Toutefois un entraînement d'éléments fins a été constaté à la sortie du drainage en 1994 après une crue exceptionnelle au cours de laquelle le niveau du plan d'eau a pratiquement atteint la cote de la crête du barrage. La surveillance du barrage a montré l'absence de ce phénomène pour un plan d'eau à la cote normale. Ce problème semble donc étroitement liée à la surélévation du plan d'eau qui aurait conduit à un contournement du dispositif d'étanchéité, soit à la liaison avec les versants, soit au-dessus de la géomembrane qui s'arrête à quelques dizaines de cm sous la crête.

Barrage de Cournauron (Néris)

Servant à l'alimentation en eau potable de la commune de Néris-les-Bains, le barrage de Cournauron est constitué d'un remblai en enrochements compactés de 14 m de hauteur au-dessus du terrain naturel. Construit de 1972 à 1975, et mis en eau en 1975, il est doté d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane sur le parement amont de fruit 1,6 :

- fermeture du remblai en matériaux concassés 0/40 sur 0,15 m d'épaisseur ;
- imprégnation à l'émulsion de bitume acide ;
- enrobé à froid de 3 cm d'épaisseur ;
- membrane Butyl » 20/10 mm ;
- géotextile 1,5 cm en partie inférieure (sur 10 m de haut) ;
- dallettes de protection en béton 1 x 0,8 x 0,04 m munies d'évents.

L'étanchéité est prolongée en fondation par un parafouille de pied amont et un voile d'injection de 20 m de profondeur.

Une inspection subaquatique par plongeur équipé de caméra, faite en février 1994, n'a pas révélé de désordre apparent sur les dallettes de protection du parement amont. Cependant, à partir de 2,5 m de profondeur, la visibilité était réduite et un dépôt de vase masquait le béton. À 7,5 m de profondeur, ce dépôt atteignait une épaisseur de 20 à 30 cm.

Une inspection visuelle faite par Safège en avril 1993, retenue pleine, montre des ondulations en partie émergée du parement amont avec décalage de plusieurs dalles (en rive droite). Une nouvelle inspection visuelle faite par le Cemagref en novembre 1999, retenue pleine, n'a pas révélé d'aggravation des déformations en rive droite, mais a permis de noter un début de développement de la végétation dans les joints entre les dallettes du parement amont. Un nettoyage soigneux a été réalisé depuis lors.

Malgré les recommandations réitérées du service de contrôle, ce barrage ne fait pas l'objet d'un suivi par auscultation et on ne dispose donc pas d'informations sur l'évolution éventuelle des fuites, nous permettant d'avoir une indication sur le vieillissement de la géomembrane. Une inspection complète avec vidange est cependant prévue dans les années à venir.

Barrage du Mas-d'Armand

Le barrage du Mas-d'Armand permet de maintenir à niveau constant un plan d'eau de 14 hectares sur un des bras de la retenue du barrage de Naussac. Il s'agit d'un remblai d'enrochements de 19 m de hauteur, à masque amont, construit sur une fondation rocheuse assez médiocre. Ce barrage est équipé d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane raccordé en pied à un parafouille creusé en fondation et empli d'argile. Le DEG, de 9 200 m² de surface, est constitué :

- d'une couche de transition 0/200 mm ;
- d'un géotextile ;
- d'une membrane bitumineuse de 5 mm d'épaisseur ;
- d'une protection par des pavés collés sur des bandes de géotextile.

Ce barrage a été construit en 1979-1980, mis en eau en 1981, et on dispose maintenant de plus de vingt années d'exploitation. L'étanchéité du barrage est cependant peu sollicitée, car la différence de charge entre l'amont et l'aval est pendant une bonne partie de l'année relativement faible, voire nulle. Aucun moyen de mesure ne permet de suivre l'évolution des débits de fuite et donc l'éventuel vieillissement de la membrane.

Deux visites effectuées par le Cemagref dans le courant de l'été 2001 ont permis de constater quelques dégradations localisées (mais en d'assez nombreux endroits) sur la protection de la géomembrane dans la zone de batillage : des groupes de pavés se sont décollés des bandes de géotextile ; ce dernier n'étant plus protégé du rayonnement solaire se dégrade alors rapidement ; les réparations faites jusqu'alors et consistant à recoller de nouveaux pavés, ne se sont pas révélées durables, et une réparation d'ensemble de la protection dans la zone de marnage doit être réalisée à terme.

Barrage de Rouffiac

Le barrage de Rouffiac (encore dénommé Lanouaille) en Dordogne est un ouvrage en remblai étanché par géomembrane bitumineuse à l'amont, construit de 1982 à 1983 et mis en eau en 1983. D'une hauteur de 12,60 m sur fondation, ce barrage crée une retenue de 0,9 hm³ destinée à des activités de tourisme et loisirs. Le remblai qui repose sur une fondation de micaschistes (après décapage de 3,50 m de matériaux tourbeux) est constitué par des matériaux d'altération de ce mi-

caschiste (sables gravelo-limoneux 0/20 mm contenant quelques cailloux) semi-perméables ; le dispositif d'étanchéité par géomembrane mis en place sur le parement amont de fruit 2,5 est constitué successivement à partir du remblai des éléments suivants :

- tuyaux drainants en surface du remblai préalablement débarrassé de ses éléments grossiers ;
- géotextile non tissé (380 g/m²) ;
- géomembrane bitumineuse (4 mm d'épaisseur) ;
- géotextile non tissé (380 g/m²) ;
- grave roulée 0/30 mm (15 cm d'épaisseur) ;
- enrochements 0/250 mm (35 cm d'épaisseur) limités à la partie supérieure du talus (calés par une risberme de 0,5 m de large).

La liaison avec le substratum est assurée par une tranchée réalisée au brise-roche (0,80 m de profondeur et 0,50 m de largeur minimum) remplie de béton ; la géomembrane a été collée à chaud sur ce massif béton préalablement imprégné par un produit bitumineux sur 30 cm de largeur ; une platine métallique consolide cette liaison. Par ailleurs, cinq collecteurs étanches évacuent vers l'aval l'eau recueillie sous la géomembrane d'étanchéité amont. Ces « drains » débouchent au pied du talus aval de façon à ce que leur débit puisse être mesuré par entonnoement. Nous ne disposons pas de l'ensemble des mesures de ces débits depuis la mise en eau de l'ouvrage et aucune interprétation de ces mesures n'a été réalisée ; toutefois celles effectuées ces dernières années permettent de dégager les tendances suivantes :

- les deux drains placés sur les versants sont secs ou présentent un débit faible (inférieur à 1 l/min) ;
- les trois drains placés en fond de vallée coulent par intermittence avec un débit moyen de quelques litres par minute avec des pointes de 10 à 20 l/min.

En l'absence d'une analyse détaillée de ces mesures, on peut cependant constater qu'aucune évolution irréversible dans le temps de ces débits de fuite n'est observable. Le comportement du barrage, près de vingt ans après sa mise en service, est satisfaisant. Toutefois la piézométrie dans le remblai est relativement élevée, en relation semble-t-il

avec le niveau élevé des nappes de versant ; ce point est également susceptible d'expliquer les variations de débit de fuite. Une analyse de l'influence relative de ces différents paramètres est prévue au cours de l'année 2002 en incluant des mesures réalisées avec variation du niveau du plan d'eau, qui reste habituellement quasiment constant tout au long de l'année.

Conclusions

Plus de trente ans après la mise en place des premières géomembranes pour assurer l'étanchéité de barrages en remblai, l'examen du comportement des principaux ouvrages français nous permet d'apporter des réponses aux légitimes interrogations que se posaient les maîtres d'ouvrage sur la longévité de ce type d'étanchéité. D'une part, la qualité de l'étanchéité obtenue est très satisfaisante et d'autre part, on ne constate pas de vieillissement prématuré de ces dispositifs d'étanchéité mettant en œuvre des géosynthétiques. Ceci se traduit, dans la plupart des cas, par des débits de fuite relativement faibles qui ne présentent pas d'évolution dans le temps. Par ailleurs, le suivi des propriétés mécaniques et physico-chimiques de la géomembrane du barrage d'Aubrac confirme que le géosynthétique en lui-même ne présente pas de processus de vieillissement rapide, ce qui laisse présager une durée de vie importante.

Les quelques « contre-exemples » qui ont pu être rencontrés parfois sur des barrages, mais surtout sur des bassins, tiennent plus à une recherche excessive d'économies et/ou à des défauts d'exécution ; les désordres apparaissent en général rapidement, sont souvent difficiles à réparer et nuisent à la longévité du dispositif d'étanchéité.

Grâce au retour d'expérience, on dispose maintenant de matériaux manufacturés, de références techniques et d'un savoir-faire qui nous paraissent à même de garantir l'efficacité et la durabilité des DEG dans le domaine des ouvrages en remblai. Ces connaissances sont désormais rassemblées dans un certain nombre de publications techniques incontournables pour tout ingénieur ou technicien impliqué dans un projet de barrage étanché par géomembrane (ICOLD et CIGB, 1991 ; Rollin *et al.*, 2002). □

Remerciements

Nous remercions les bureaux d'études ISL, Safège, Somival et Géo+, la SDEI (Rodez) et les DDAF concernées qui nous ont permis d'avoir accès aux données d'auscultation des ouvrages.

Résumé

La France a été un des premiers pays à développer l'utilisation des DEG (dispositifs d'étanchéité par géomembrane) pour les barrages en remblai. Il est donc particulièrement intéressant de valoriser le retour d'expérience à partir de ce parc d'ouvrages dont les plus anciens datent maintenant de plus de trente ans. Le présent article le fait sous trois aspects : étude de vieillissement des géomembranes en place dans les ouvrages à partir de prélèvements et d'essais de laboratoire, efficacité globale du DEG au travers de l'évolution du débit de fuite, aspects qualitatifs à partir de l'inspection visuelle. Il en ressort que, sous réserve d'une bonne conception et d'une bonne mise en œuvre du DEG, le bilan sur les barrages de ce type apparaît aujourd'hui très satisfaisant.

Abstract

France has been one of the most active countries in the development of geomembrane based facings (GBF) for embankment dams. Therefore it is interesting to draw lessons from the return of experience on this portfolio of dams, whose oldest are now more than thirty years old. This paper does that on three topics: ageing study of geomembranes through in situ samples and laboratory tests, global efficiency of the GBF through evolution of leakage measurements, qualitative aspects through visual inspection. It can be concluded that, if well designed and placed, these GBF have a very satisfactory behaviour.

Bibliographie

ALONSO, E., GIRARD, H., POULAIN, D., 1996, Barrages en terre munis d'une géomembrane, Les géotextiles et les géomembranes dans les barrages, *Colloque technique CFGB CFG, Paris, 11 juin 1996*, p. 10.1-10.16.

TISSERAND, C., 1996, Barrages en enrochement munis d'une géomembrane, Les géotextiles et les géomembranes dans les barrages, *Colloque technique CFGB CFG, Paris, 11 juin 1996*, p. 9.1-9.9.

GIRARD, H., FISCHER, S., ALONSO, E., 1990, Problems of friction posed by the use of geomembranes on dam slopes – Examples and measurements, *Geotextiles and Geomembranes*, 9, p. 129-143, England, Elsevier.

ICOLD / CIGB, 1991, Watertight geomembranes for dams -State of the art / Etanchéité des barrages par géomembranes - Technique actuelle, *Bulletin technique CIGB*, n° 78, Paris, 140 p. (actualisation en cours).

ROLLIN, A., PIERSON, P., LAMBERT, S., 2002, *Géomembranes, Guide de choix*, Presses Internationales Polytechnique, Montréal, Commercialisation pour la France : Tec & Doc Lavoisier, 312 p.