



HAL
open science

Les géosynthétiques dans les barrages : matériaux et utilisations

H. Girard, J.J. Fry

► **To cite this version:**

H. Girard, J.J. Fry. Les géosynthétiques dans les barrages : matériaux et utilisations. Cemagref Editions, pp.148, 2002, 2-85362-600-8. hal-02580550

HAL Id: hal-02580550

<https://hal.inrae.fr/hal-02580550v1>

Submitted on 21 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ACTES DE
COLLOQUE

Saint Étienne
18 & 19 juin 2002

CFG – CFGB
France

PUB00010320

Les Géosynthétiques dans les barrages : matériaux et utilisations

EMA
53

Cemagref
EDITIONS

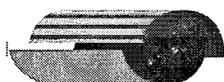
CEMAGREF
DOCUMENTATION
CLERMONT-FERRAND

Les Géosynthétiques dans les barrages : matériaux et utilisations

Actes du Colloque Technique
Saint - Étienne (Loire)
18 et 19 juin 2002

Coordinateurs :
Hugues GIRARD
et
Jean-Jacques FRY

COMITE FRANCAIS



GEOSYNTHETIQUES



COMITÉ FRANÇAIS

DES

GRANDS BARRAGES

Actes du colloque technique « **Les géosynthétiques dans les barrages : matériaux et utilisations** » – Saint Étienne – 18 et 19 juin 2002. Coordination : Hugues Girard et Jean Jacques FRY. Dépôt légal : second trimestre 2002 – Cemagref Editions, BP 44, 92163 Antony Cedex. Tél : 01 40 96 62 85. Suivi de l'édition : Valérie Pagneux et Camille Cédra (Cemagref). Imprimé et façonné au Cemagref. ISBN 2-85362-600-8 – Prix 19,00 € ttc.

AVANT – PROPOS

Organisé à Saint - Étienne (Loire) les 18 et 19 juin 2002 à l'initiative du Comité Français des Géosynthétiques (CFG) et du Comité Français des Grands Barrages (CFGB), le colloque technique "**Les Géosynthétiques dans les barrages : matériaux et utilisations**" correspond à la volonté des deux comités de mettre en commun et de synthétiser leurs connaissances et leurs retours d'expérience dans ce domaine d'utilisation des géosynthétiques, tout en examinant les évolutions possibles.

Une trentaine d'années après les premières utilisations des géosynthétiques dans les barrages en France et 6 ans après le premier colloque commun CFG / CFGB en 1996, le présent colloque qui regroupe 9 communications est l'occasion de :

- ❑ faire le point sur les évolutions récentes de la normalisation avec, en particulier, la présentation des normes d'application ;
- ❑ décrire les derniers développements de la certification dans le domaine des géomembranes, qui fait suite à celle des géotextiles ;
- ❑ détailler le sujet essentiel des contrôles durant le chantier et en service ;
- ❑ examiner la question de la durabilité à partir de retours d'expérience, tant pour les géotextiles que les géomembranes ;
- ❑ présenter en détail trois barrages réhabilités récemment par géomembrane, avec la visite de deux d'entre eux situés à proximité immédiate de Saint - Étienne.

Les communications présentées confirment que les géosynthétiques constituent de plus en plus des solutions à part entière techniquement et économiquement intéressantes et non plus de simples variantes aux solutions plus anciennes ; mais, comme pour toutes les techniques, il convient de ne pas oublier que la fiabilité des solutions géosynthétiques nécessite qu'elles soient bien conçues, bien réalisées et bien contrôlées.

ORGANISATION

Placé sous la présidence de Daniel FAYOUX (Président du CFG, Alkor Draka) et de Bernard TARDIEU (Président du CFGB, Coyne et Bellier), l'organisation de ce colloque technique a été réalisée par :

- Hugues GIRARD (membre du conseil du CFG, Cemagref Bordeaux),*
- Jean-Jacques FRY (Secrétaire CFGB, EDF-CIH).*

Les deux comités tiennent à remercier tout particulièrement :

- Marie-Odile CAVAILLES (membre du conseil du CFG, SETRA) et Elisabeth HAZA (membre du conseil du CFG, LCPC) pour leur participation à la relecture des communications),*
- Christine de LABOUCHERE (Secrétariat CFGB) et Danièle PECK (Secrétariat CFG) pour l'organisation logistique du colloque),*
- Jacques BONNET (Cemagref Bordeaux) pour la réalisation de la plaquette d'annonce,*
- Le service de l'information scientifique et technique et l'équipe de l'imprimerie du Cemagref pour l'édition des actes.*

PROGRAMME

Mardi 18 juin 2002 – Soirée d'accueil

Mercredi 19 juin 2002 - Matinée : Sessions techniques

8 h 00 - 8 h 30 : **Accueil**

8 h 30 - 10 h 00 : **Matériaux - Contrôle - Recommandations**

Président de séance : D. FAYOUX (Président du CFG, Alkor Draka)

Vice Présidents de séance : P. LE DELLIOU (Vice Président CFGB, BETCGB) -
H. GIRARD (CFG, Cemagref)

- La normalisation des géosynthétiques - F. CAQUEL (LRPC Nancy), Ph. DELMAS (Bidim Geosynthetics) - (Secrétaire et Président de la commission de normalisation AFNOR - BNSR)
- La certification dans le domaine des géosynthétiques (matériaux, soudeurs, entreprises) - R. BIGUET (ASQUAL)
- Les contrôles sur chantier - J-P. BENNETON (LRPC Lyon)
- Les méthodes de détection de fuites dans les géomembranes - N. TOUZE-FOLTZ (Cemagref)
- Les géotextiles dans les barrages : retours d'expérience - G. DEGOUTTE (ENGREF), J-J. FRY (EDF)

10 h 00 - 10 h 30 : **Pause**

10 h 30 - 12 h 15 : **Retours d'expérience sur l'utilisation des géomembranes**

Président de séance : B. TARDIEU (Président du CFGB, Coyne et Bellier)

Vice Présidents de séance : F. CAQUEL (Vice Président CFG, LRPC Nancy) -
J-J. FRY (secrétaire CFGB, EDF-CNEH)

- Utilisation d'une géomembrane pour la réhabilitation du barrage de La RIVE - A. YZIQUEL (SOGREAH)
- Utilisation de géomembranes pour la réhabilitation des barrages de L'ECHAPRE et du ROUCHAIN - O. CREPON et M. LINO (ISL)
- La durabilité des géomembranes dans les barrages - D. POULAIN et P. ROYET (Cemagref), C. TISSERAND (OEHC)
- Les travaux du groupe de la CIGB sur les géomembranes dans les barrages - H. GIRARD (Cemagref), M. LEFRANC (EDF)

12 h 15 - 12 h 45 : **Discussions et bilan de la matinée**

Exposition technique

Parallèlement aux conférences, une exposition technique sera organisée.

Mercredi 19 juin 2002 - Après midi : Visites techniques

14 h 30 - 17 h 00 : **Visites des barrages de l'ECHAPRE et de la RIVE** (retour à la gare de Saint Etienne à 17 h 30)

OU

14 h 30 - 18 h 00 : **Visites des barrages de l'ECHAPRE, de la RIVE et du PINEY** (visite complémentaire d'un barrage mis hors service) (retour à la gare de Saint Etienne à 18 h 30)

Sommaire

Normalisation européenne et marquage CE	9
François Caquel, CETE de l'Est et Philippe Delmas, BIDIM Geosynthetics S.A.	
La certification ASQUAL des géosynthétiques.....	17
Robert Biguet, ASQUAL	
Contrôles des géosynthétiques dans les barrages.....	21
Jean-Paul Benneton, CETE de Lyon	
Méthodes de détection et de localisation de défauts.....	35
dans les géomembranes, Nathalie Touze-Foltz, Cemagref	
Les géotextiles dans les barrages : retours d'expérience	50
Gérard Degoutte, ENGREF et Jean-Jacques Fry EDF-CIH	
Le groupe de travail européen sur les géomembranes	79
mises en œuvre sur les barrages Marc Lefranc, EDF-CIH et Hugues Girard, Cemagref	
La durabilité des géomembranes dans les barrages en remblai	97
Claude Tisserand, O.E.H.C, Daniel Poulain et Paul Royet, Cemagref	
Réhabilitation par géomembranes des barrages de l'Echapre et du Rouchain .	119
Olivier Crépon et Michel Lino, ISL Bureau d'Ingénieurs-Conseils	
Barrage de la Rive : confortement par géomembrane d'un barrage ancien	137
Pierre Agresti et Alain Yziquel, SOGREAH	

Normalisation européenne et marquage CE

European standardization and CE marking

François CAQUEL¹, Ministère de l'Équipement
CETE de l'Est – LRPC Nancy,
71 rue de la Grande Haie
54510 TOMBLAINE
Téléphone : 03-83-18-41-56
Télécopie – 03-83-18-41-00
E-Mail francois.caquel@equipement.gouv.fr

Philippe DELMAS²,
BIDIM GEOSYNTHETICS S.A.,
9 Rue Marcel Paul
BP 80 – 95873 BEZONS Cedex
Téléphone : 01-34-23-53-95
Télécopie – 01-34-23-53-64
E-Mail philippe.delmas@bidim.com

Résumé : Cette communication présente la structure générale des nouvelles normes, dites "d'application", pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés dans les ouvrages de génie civil et de protection de l'environnement et leurs implications pour le marquage CE.

Abstract: this paper presents the general structure of the new "application" standards for the use of geotextiles and related products in civil engineering and environment protection works and their links with CE marking.

Mots clés : barrages – géotextiles – caractéristiques requises – marquage CE – normes d'application – réservoirs.

Keywords: application standards – CE marking – dams - geotextiles – required characteristics – reservoirs.

La mise en application de la Directive 89/106 sur les Produits de la Construction (DPC) a généré un vaste programme de normalisation européenne. C'est dans le cadre d'un mandat (M/107) donné par la Commission Européenne de Normalisation (CEN) que sont réalisés les travaux de normalisation dans le domaine des géotextiles et notamment les normes dites "d'application" publiées en 2002.

Ces normes précisent les "**caractéristiques requises**" pour l'utilisation des **géotextiles et produits apparentés dans divers ouvrages** de génie civil et de protection de l'environnement : routes, voies ferrées, centres de stockages de déchets solides, etc.³. En d'autres termes elles indiquent, selon la fonction

¹ Secrétaire de la commission de normalisation BNSR – GSY

² Président de la commission de normalisation BNSR - GSY

³ Voir en annexe la liste complète de ces normes.

remplie⁴ par le géotextile dans un ouvrage donné ou une application spécifique, les caractéristiques pertinentes qu'il convient de spécifier ainsi que les méthodes d'essais appropriées pour la détermination de ces caractéristiques.

Elles s'adressent donc aux concepteurs et utilisateurs finals qui pourront définir les fonctions et les conditions d'utilisation appropriées des géotextiles dans les ouvrages dont ils sont en charge.

Parmi la série des 10 normes "d'application", l'une (**NF EN 13254**) est spécifique aux "**réservoirs et barrages**". Le tableau 1 résume les fonctions, les caractéristiques liées aux fonctions et méthodes d'essais correspondantes, pour les géotextiles utilisés dans ces ouvrages.

Ces normes comportent des procédures permettant d'évaluer la conformité des produits aux caractéristiques et de contrôler la production en usine.

Elles comportent également une annexe spéciale, l'**annexe Z**, qui définit ce qui dans la norme constitue la "partie harmonisée", en rapport avec les "**exigences essentielles**", notamment la sécurité, définies par la (les) directives(s) européenne(s), et avec laquelle les producteurs devront se mettre en conformité pour pouvoir apposer le **marquage CE**⁵ sur leurs produits et donc les mettre sur le marché⁶.

Ces normes permettent ainsi aux producteurs de décrire leurs produits sur la base de valeurs déclarées pour les caractéristiques concernant l'utilisation prévue.

Ces normes **ne s'appliquent pas aux géomembranes**. Pour ces dernières et pour les géosynthétiques bentonitiques, des normes équivalentes, élaborées selon le même canevas que les "normes géotextiles", seront soumises à enquête et vote formel selon la procédure dite "accélérée" au cours de l'année 2002. L'une d'elles (**pr EN 13361**) traite plus particulièrement des **réservoirs et barrages**.

⁴ Les principales fonctions des géotextiles sont la filtration, la séparation, le drainage, le renforcement et la protection ; la fonction séparation étant toujours utilisée conjointement avec une autre fonction, elle ne peut être spécifiée seule.

⁵ Le marquage CE signifie que le produit satisfait à certaines exigences ; c'est un outil réglementaire. Il est apposé sur l'emballage et doit s'accompagner de documents donnant des informations complètes relatives notamment à l'utilisation prévue et les valeurs sur les caractéristiques "harmonisées". Le marquage CE est à distinguer d'une marque de certification (genre marque NF ou certification Asqual) et du marquage sur le produit lui-même tel que défini dans la norme ISO 10318.

⁶ L'entrée en vigueur du marquage CE pour les géotextiles et produits apparentés est fixée au 1^{er} octobre 2002 par l'arrêté du 19 novembre 2001 portant application du décret n° 92-647 du 8 juillet 1992 modifié par le décret n° 95-1051 du 20 septembre 1995.

Tableau 1 – Géotextiles et produits apparentés utilisés dans la construction des réservoirs et des barrages – Fonctions, caractéristiques liées aux fonctions et méthodes d'essai à utiliser

Caractéristiques	Méthode d'essai	Fonction			
		F *	S *	R *	P *
(1) Résistance à la traction ^{b)}	EN ISO 10319	H	H	H	H
(2) Allongement sous charge maximale	EN ISO 10319	A	A	H	H
(3) Résistance à la traction des soudures et joints	EN ISO 10321	S	S	S	S
(4) Poinçonnement statique (essai CBR) ^{a, b}	EN ISO 12236	S	H	H	(voir 9)
(5) Résistance à la perforation dynamique (chute de cône) ^a	EN 918	H	A	H	H
(6) Caractéristiques en frottement (méthode du cisaillement direct)	prEN ISO 12957-1: 1997 et prEN ISO 12957-2: 1997	S	S	A	S
(7) Fluage en traction	EN ISO 13431	--	--	A	--
(8) Endommagement à la mise en œuvre	ENV ISO 10722-1	A	A	A	A
(9) Efficacité de la protection	prEN 13719: 1999	--	--	--	H
(10) Ouverture de filtration caractéristique	EN ISO 12956	H	A	--	--
(11) Perméabilité perpendiculairement au plan	EN ISO 11058	H	A	A	--
(12) Durabilité	Conformément à l'annexe B	H	H	H	H
(12.1) Résistance aux agents climatiques	ENV 12224	A	A	A	A
(12.2) Résistance au vieillissement chimique	ENV 12447, ENV ISO 12960 ou ENV ISO 13438	S	S	S	S
(12.3) Résistance à la dégradation microbiologique	ENV 12225	S	S	S	S

• F : Filtration – S : Séparation – R : Renforcement – P : Protection

H : nécessaire pour l'harmonisation

A : s'applique à toutes les conditions d'utilisation

S : s'applique à des conditions spécifiques d'utilisation.

" -- " indique que les caractéristiques ne sont pas applicables à la fonction en question.

^a il convient de considérer avec attention la validité de ces essais dont le principe peut ne pas être applicable à certains types de produits (par exemple les géogrilles).

^b si les propriétés mécaniques (traction et poinçonnement statique) sont indiquées H cela signifie que le producteur doit fournir les données pour ces deux propriétés. L'emploi de l'une seulement (résistance en traction ou poinçonnement statique) est suffisant dans la spécification.

NORMES FRANCAISES "GÉOMEMBRANES"

Publiées au 1^{er} mai 2002

NF P 84 500	Terminologie.
NF P 84 501	Détermination des caractéristiques en traction.
NF P 84 502-1	Essais sur joints : détermination des caractéristiques en traction-cisaillement.
NF P 84 502-2	Essais sur joints : détermination de la résistance en traction pelage.
NF P 84 504	Échantillonnage.
NF P 84 505	Mesure de l'angle de frottement "géomembrane-sable normal" à la boîte de cisaillement.
NF P 84 506	Détermination de la résistance au poinçonnement dynamique.
NF P 84 507	Détermination de la résistance au poinçonnement statique des géomembranes et des dispositifs d'étanchéité par géomembranes. Cas du poinçon cylindrique sans support.
NF P 84 509	Comportement dans l'eau - Essai accéléré et essai à long terme - Examen gravimétrique.
NF P 84 510	DEG – Détermination de la résistance au percement par granulats sur support rigide.
NF P 84 511.2	Détermination des caractéristiques en souplesse.
XP P 84 512.1	DEG – Détermination de l'épaisseur. Cas des géomembranes lisses.
NF P 84 514	Détermination de la masse surfacique.
NF P 84 515	Mesure du niveau d'étanchéité conventionnel des géomembranes.
NF P 84 520	Identification sur site.
NF P 84 522	DEG – Mesure de l'angle de glissement à l'aide d'un plan incliné.

NORMES FRANCAISES GEOTEXTILES

Publiées au 1^{er} mai 2002

NF G 38 000	Vocabulaire des géotextiles.
NF G 38 010	Atmosphère de conditionnement et d'essais.
NF G 38 019	Détermination de la résistance au poinçonnement.
NF G 38 021-2	Détermination des caractéristiques en souplesse. (Approche tridimensionnelle)
NF G 38 040	Grille de résultats. (1)
NF G 38 050	Identification. (1)
NF G 38 060	Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés. Mise en oeuvre - Spécifications - Contrôle des géotextiles et produits apparentés. (1)
NF G 38 061	Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés. Détermination des caractéristiques hydrauliques et mise en oeuvre des géotextiles et produits apparentés utilisés dans les systèmes de drainage et de filtration. (2)
NF G 38 063	Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés. Utilisation des géotextiles et produits apparentés sous remblais sur sols compressibles. (2)

(1) seront retirées à la parution des normes européennes équivalentes.

(2) normes en cours de révision.

NORMES EUROPÉENNES

Publiées au 1^{er} mai 2002

NF EN 918	Essai de perforation dynamique (Essai par chute d'un cône)
NF EN 963	Echantillonnage - Prélèvement des éprouvettes.
NF EN 964-1	Détermination de l'épaisseur.
NF EN 965	Détermination de la masse surfacique.
NF EN ISO 9863-2	Détermination de l'épaisseur à des pressions prescrites. Méthode de détermination de l'épaisseur des couches individuelles de produits multicouches
NF EN ISO 10319	Essai de traction des bandes larges.
NF EN ISO 10320	Identification sur site.
NF EN ISO 10321	Essai de traction pour joints/coutures par la méthode de la bande large.
NF EN ISO 11058	Détermination des caractéristiques de perméabilité à l'eau normalement au plan, sans contrainte mécanique.
NF EN 12224	Détermination de la résistance aux essais climatiques.
NF EN 12225	Méthode pour la détermination de la résistance microbologique par un essai d'enterrement.
NF EN 12226	Essais généraux pour l'évaluation après les essais de durabilité.
NF EN ISO 12236	Essai de poinçonnement statique (essai CBR)
NF EN ISO 12956	Détermination de l'ouverture de filtration caractéristique.
NF EN ISO 12958	Détermination de la capacité de débit dans le plan.
NF EN ISO 13427	Simulation de l'endommagement par abrasion (essai du bloc glissant)
NF EN ISO 13431	Détermination du comportement en fluage et de la rupture au fluage en traction.

NF EN ISO 13437	Méthode pour l'installation et l'extraction d'échantillons dans le sol et pour la réalisation d'essais en laboratoire sur les éprouvettes.
NF EN 13562	Détermination de la résistance à la pénétration de l'eau.
XP ENV 1897	Détermination des propriétés de fluage en compression.
XP EN V ISO 10722-1	Mode opératoire de simulation des dégâts lors de l'installation. Installation dans les matériaux granulaires.
NF EN 13249	Géotextiles et Produits apparentés - caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction des routes et autres zones de circulation.
NF EN 13250	Idem – voies ferrées.
NF EN 13251	Idem – travaux de terrassement, fondations et structures de soutènement.
NF EN 13252	Idem – systèmes de drainage
NF EN 13253	Idem – systèmes de lutte contre l'érosion (protection côtière et revêtement de berge)
NF EN 13254	Idem – réservoirs et barrages
NF EN 13255	Idem – canaux
NF EN 13256	Idem – tunnels et structures souterraines
NF EN 13257	Idem – ouvrages d'enfouissement des déchets solides
NF EN 13265	Idem – ouvrages de confinement des déchets liquides.

La certification ASQUAL des géosynthétiques

ASQUAL geosynthetics certification

Robert BIGUET
ASQUAL
14, rue des reculettes
75013 PARIS
Tél : 01-44-08-19-00
Fax : 01-44-08-19-39
e-mail : direction@asqual.com
site web : www.asqual.com

Résumé : La communication présente la démarche entreprise par l'ASQUAL pour assurer la certification des géosynthétiques

Abstract: This communication shows the process undertaken by ASQUAL to ensure the certification of geosynthetics

Mots-clés : certification, géotextiles, géomembranes

Keywords: certification, geotextiles, geomembranes

Introduction

L'Asqual – association sans but lucratif - a été créée pour promouvoir la qualité et développer la certification suivant la loi du 3 juin 1994 et son décret du 30 mars 1995 relatifs à la certification des produits et services.

Elle s'est beaucoup investie dans les géosynthétiques à la demande des partenaires économiques impliqués dans ce domaine, notamment ceux appartenant au Comité Français des Géosynthétiques (CFG). La certification concerne maintenant les géotextiles, les géomembranes, l'application des géomembranes pour le soudage et la responsabilité de chantier.

1. Les géotextiles

La certification des géotextiles est engagée depuis plus de 10 ans et s'applique à plus de 110 produits représentant environ 90 % du marché français.

Après un audit de l'entreprise, un prélèvement d'échantillons est effectué pour la réalisation d'essais en laboratoires qui comprend en particulier des caractéristiques d'identification, mécaniques et hydrauliques. Les résultats des essais sont comparés aux valeurs annoncées par le producteur avec des tolérances fixées comme suit :

- Caractéristiques d'identification :

- Masse surfacique : V_{nap} - tolérance $\pm 10\%$
- Epaisseur : V_{nap} - tolérance $\pm 20\%$

- Caractéristiques mécaniques :

- Traction : V_{Nap} - tolérance $- 13\%$
- Allongement : V_{nap} - tolérance $\pm 23\%$
- Poinçonnement : V_{nap} - tolérance $- 30\%$
- Perforation dynamique : V_{Nap} - tolérance $+ 20\%$

- Caractéristiques hydrauliques :

- Perméabilité : V_{Nap} – tolérance $- 30\%$
- Ouverture de filtration : V_{Nap} – tolérance $\pm 30\%$
- Capacité de débit dans le plan : $10\% \log p$ ou $< 1.10^{-7}$

Sur la base d'un référentiel publié au Journal Officiel, un Comité Technique représentatif des intérêts des producteurs, des donneurs d'ordre des utilisateurs, des organismes techniques, propose la certification et l'évolution des règles de fonctionnement.

Une nouvelle étape intervient avec l'obligation de marquage CE à partir du 1^{er} octobre 2002 qui impose la prise en compte des applications et fonctions considérées (drainage, filtration, séparation, renforcement, protection).

2. Les géomembranes

La certification des géomembranes est maintenant engagée depuis 4 ans. Environ 30 produits représentant approximativement 60% du marché sont certifiés dans différentes familles : bitume, EPDM, PEHD, PP.F, PVC-P.

Les principales caractéristiques retenues sur le certificat concernent :

- Épaisseur fonctionnelle
- Largeur
- Masse surfacique
- Poinçonnement statique
- Traction
- Flux

Différents critères complémentaires variant en fonction de la famille chimique des géomembranes sont également pris en compte tels que :

- Masse volumique
- Teneur en liant/charge
- Teneur en noir de carbone
- Essais spécifiques sur bitume
- Analyse thermique
- Spectrographie IR
- Chromatographie en phase gazeuse
- Pourcentage de plastifiant...

3. Les applications de géomembranes

La certification relative à l'application des géomembranes concerne actuellement le soudage et la responsabilité de chantier.

3.1 Soudage

L'entreprise demande une certification dans le cadre de familles chimiques de géomembranes telles que celles énoncées précédemment. Elle désigne des soudeurs à certifier qui utilisent le matériel de soudage et de contrôle de l'entreprise.

Une épreuve théorique « QCM » est associée à une épreuve pratique sur site ou en atelier. Elle s'applique également aux ouvrages souterrains.

A la suite de l'épreuve pratique, des essais complémentaires de résistance de la soudure sont effectués.

Cette certification concerne 150 applications. Elle s'adresse à une activité de service et ne doit pas être confondue avec une sélection basée uniquement sur une qualification de personnes.

3.2. Responsabilité de chantier

Dans le même esprit, une certification pour la responsabilité de chantier est opérationnelle.

Les candidats doivent avoir obtenu une certification soudage pour pouvoir se présenter ensuite à la responsabilité de chantier. Un QCM est alors administré.

Aujourd'hui, environ 30 certifications « Responsabilité de chantier » ont été acquises.

En complément, une réflexion est engagée pour la certification de l'ensemble de l'application soudage d'une entreprise.

4. Enseignements retirés de cette certification ASQUAL

La certification permet de créer une base de communication objective entre les différents intervenants de la « chaîne des géosynthétiques ».

L'expérience de la certification des géotextiles a constitué une base fondamentale pour développer les certifications liées aux géomembranes.

Et la représentativité de la certification devient bonne sur les marchés où prescripteurs et utilisateurs lui accordent une bonne crédibilité.

La certification, pour réussir, doit constamment se préoccuper des besoins du terrain et peut progresser encore.

Contrôles des géosynthétiques dans les barrages

Geosynthetics in dams - controls

Jean-Paul BENNETON, Ministère de l'Équipement - Centre d'Etudes Techniques
de l'Équipement de Lyon - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon
25 avenue François Mitterrand - 69674 - BRON CEDEX
Téléphone - 04.72.14.31.99 - Télécopie - 04.72.14.33.43
E-Mail jean-paul.benneton@equipement.gouv.fr

Résumé : Cette communication décrit, d'une manière générale, le contenu de la démarche qualité qui peut être conduite lors de l'utilisation de géosynthétiques-géotextiles et géomembranes - dans des ouvrages hydrauliques en terre. Pour les produits manufacturés les programmes de contrôle présentés prennent en compte, pour une caractéristique donnée, l'évaluation du risque lié à un ouvrage donné et la certification éventuelle des produits. On présente les contrôles à effectuer pour chaque phase de travaux ; pour les joints de géomembranes, on propose des critères de réception et des fréquences de contrôle prenant en compte la certification des soudeurs. On décrit un schéma général d'organisation et de gestion de la qualité et une répartition entre contrôles intérieurs à l'entreprise et extérieurs et des points d'arrêt.

Abstract: this paper is an overview of the quality approach to be adopted when using geosynthetics - geotextiles and geomembranes - in hydraulic earth structures. As for manufactured products, inspection programmes take into account the risk assessment for a given property and certification of the products. Work phases to be controlled are listed and acceptance criteria and inspection programmes are proposed for controlling geomembrane joints considering welders certification. Organisation and quality management schedule is presented detailing the between possible allocation of the inspections contractor and contracting authority.

Mots clés : barrages, géotextiles, géomembranes, contrôles, qualité

Keywords: dams – geotextiles – geomembranes – checking - quality

1. Présentation

Lors de l'utilisation de géosynthétiques dans des ouvrages de génie-civil, deux types de contrôles sont à considérer :

- le contrôle des matériaux,
- le contrôle de mise en œuvre, avec en particulier le contrôle des soudures dans le cas des géomembranes.

Dans le cas d'un dispositif d'étanchéité par géomembranes (DEG), des essais globaux d'étanchéité par remplissage de l'ouvrage peuvent être effectués dans le cadre de la réception s'ils sont techniquement possibles ; ils ne sont pas décrits dans la présente communication.

L'usage des géosynthétiques est un métier relativement neuf, par rapport aux métiers traditionnels du génie-civil (géotechnique, constructions en acier ou en béton), mais depuis une dizaine d'années, la démarche "qualité" a beaucoup évolué : normalisation, certification de produits et de personnels, méthodologie et spécifications pour les contrôles, schémas d'organisation de gestion et du contrôle de la qualité.

Tout contrôle a pour but d'établir une conformité d'un produit, d'un travail à un référentiel technique. Il convient donc en amont d'optimiser le projet et de dimensionner au mieux les dispositifs géosynthétiques : à quoi servirait en effet de se donner bonne conscience d'utiliser un produit certifié avec par exemple l'assurance que la masse surfacique ou l'épaisseur est bien celle annoncée par le fabricant à 10 % près, si l'on s'est trompé de 50 % sur la valeur nécessaire à la fonction du produit dans l'ouvrage ; or s'il existe plusieurs documents de recommandations générales pour l'usage des géosynthétiques - documents du CFG et du CIGB [3] [7] [8] - il y a encore très peu d'applications pour lesquelles un cadre de spécifications existe [1] [2]. D'autres documents du CFG ou de l'ADEME [4] donnent des spécifications pour des soudures de géomembranes mais pas de spécifications pour les géomembranes elles-mêmes.

En matière de barrage, il y a lieu d'introduire dans l'organisation des contrôles, la notion d'évaluation du RISQUE induit par la défaillance fonctionnelle d'un produit ; cette évaluation est fonction de la caractéristique fonctionnelle elle-même, de la place du matériau dans l'ouvrage, et du risque lié à l'ouvrage lui-même et à son environnement ; cette notion a été introduite pour la première fois dans la norme NFG 38-060 [5] relative à la mise en œuvre des géotextiles (Cf. § 2.1).

2. Contrôle des matériaux

2.1. Géotextiles (et produits apparentés)

Pour le contrôle, il y a lieu de considérer successivement la nature des caractéristiques fonctionnelles à prendre en compte et la fréquence des essais ;

celle-ci sera fonction de la caractéristique elle-même et de la certification ou non du produit et de l'évaluation du risque.

- **les caractéristiques fonctionnelles** à prendre en compte sont mentionnées dans la norme NF EN 13254 (septembre 2001) [6] qui régit le marquage CE sur ces produits, obligatoire en octobre 2002. Dans le tableau 1 de cette norme repris en annexe à ce texte sont mentionnées pour les grandes fonctions du géotextile (filtration, séparation, renforcement, protection) les caractéristiques à mesurer (résistance en traction, résistance au poinçonnement, etc, ...) ainsi que la méthode d'essai. Toutes ces caractéristiques sont à considérer au niveau du projet mais pour un contrôle, on s'en tient généralement seulement aux caractéristiques "harmonisées" (sigle H).

A noter que les essais de durabilité également notés H, ne peuvent généralement pas être utilisés dans le cadre d'un contrôle, du fait de leur longue durée.

A noter également que l'essai n° 9 "efficacité de protection" (très contredit ...) n'est qu'à l'état de projet actuellement est un essai assez "lourd" et non pratiqué en France à ce jour et qui provisoirement peut être remplacé par l'essai de poinçonnement pyramidal (NFG 38-019).

A ces caractéristiques fonctionnelles, on associe également des caractéristiques d'identification :

- principalement masse surfacique (NF EN 965),
- éventuellement épaisseur (NF EN 964-1 et NF EN ISO 9863-2),
- identification sur site (NF EN ISO 10320).

- Niveau de contrôle

La norme (expérimentale) G 38-060 (juin 1994) "Recommandations pour l'emploi des géotextiles" [5] dans son paragraphe 5 "Contrôle des produits" (et dans l'annexe A) mentionne trois niveaux de contrôle : ordinaire, renforcé, exceptionnel. Un tableau donne des exemples de niveau pour des couples fonction/type d'ouvrage. Ainsi pour un filtre de dispositif drainant dans un ouvrage hydraulique "critique", les caractéristiques "permittivité" (perméabilité à l'eau normale au plan) et "ouverture de filtration" sont classées en "niveau exceptionnel" alors que la résistance en traction est classée en "niveau ordinaire".

- Fréquence de contrôle - exploitation des résultats

Dans le tableau 2 de la norme précitée, à chaque niveau de contrôle est associée une fréquence d'essai qui sera également fonction de l'existence ou non d'une certification pour le produit considéré et de la surface concernée ; on donne dans le tableau ci-dessous, à titre d'illustration, les fréquences de contrôle déterminées à partir de ces prescriptions.

Géotextile	Niveau de contrôle	Surface 10.000 m ² Nombre d'essais
Certifié	Ordinaire	0
	Renforcé	1
	exceptionnel	2
Non certifié	Ordinaire	1
	Renforcé	2
	exceptionnel	11

Tableau 1 – Niveau et fréquence de contrôle des géotextiles

On note ainsi que pour les cas critiques nécessitant un niveau exceptionnel de contrôle, la fréquence d'essai peut être réduite par 5 si on a affaire à un matériau certifié. En France, la certification est délivrée par l'ASQUAL.

La norme définit également le mode d'exploitation du résultat de contrôle ; on compare la valeur de contrôle avec la valeur nominale annoncée par le fabricant. Dans le cas d'un matériau certifié les suites à donner sont particulièrement bien définies.

2.2. Géomembranes

Il n'y a pas pour les géomembranes de norme-cadre française pour les contrôles, équivalente à la norme G 38-060 mentionnée ci-avant pour les géotextiles. Pour les caractéristiques à prendre en compte pour un contrôle, il est à l'heure actuelle, à notre avis prématuré d'utiliser les projets de normes européennes relatives aux applications (celle relative aux barrages et réservoirs est la pr NF EN 13361) car la nature des essais et leurs modalités sont actuellement loin d'être définitives. On préconise des essais de contrôle pratiqués dans la procédure de certification ASQUAL des géomembranes et repris dans le Guide SETRA/LCPC [2] pour les bassins routiers.

A noter que contrairement aux géotextiles, le contrôle ne peut porter sur les caractéristiques fonctionnelles, la seule étant "l'étanchéité", et cet essai (NF P 84-515) de par ses modalités est tout à fait inadapté au contrôle.

Essais de contrôles préconisés : masse surfacique (NF P 84-514), épaisseur (NF P 84-512.1.2), poinçonnement statique (NF P 84-507), caractéristiques en traction (à la rupture ou au seuil d'écoulement suivant la nature des géomembranes) (NF P 84-501).

Pour un matériau non certifié, un supplément d'identification est à prévoir, variable avec la nature chimique du produit et avec les données de références disponibles dans les dossiers techniques du fournisseur (nature et pourcentage de plastifiant, % de liant bitume-polymère, pourcentage de charge, spectre infra-rouge, masse volumique, pourcentage et dispersion de noir de carbone, ...).

Fréquence et mode d'utilisation du résultat : il n'y a pas actuellement comme pour les géotextiles une gradation de niveau de contrôle en fonction du risque associé au contexte.

Si l'on se réfère au document [2] et pour la même surface de 10.000 m² (cf. tableau 1 du § 2.1), on aboutit à un nombre de 1 contrôle dans le cas d'un produit certifié et à 2 pour un produit non certifié, fréquence à alléger ou à renforcer suivant le contexte.

Si le projet comporte des spécifications pour chacune des caractéristiques (cas du Guide SETRA/LCPC), il suffit de comparer le résultat de contrôle aux valeurs minima ou maxima exigibles ; ces valeurs ne doivent pas être confondues avec les valeurs nominales mentionnées sur les fiches de certification.

3. Contrôle de mise en oeuvre

3.1. Géotextiles

Le contrôle est essentiellement visuel et consiste à vérifier si les règles de mise en oeuvre, mentionnées dans la norme G 38-060, sont respectées ; il s'agit essentiellement :

- livraison, stockage des produits dans leur emballage d'origine,
- état du support en fin de préparation,
- condition de pose et mode d'assemblage,
- adaptation de l'organisation du chantier pour mettre en oeuvre les couches de recouvrement (en particulier circulation des engins sur les nappes de géotextiles si celle-ci ne peut être évitée) ; suivi des planches d'essai éventuelles,
- dispositions de protection contre le vent.

3.2. Géomembranes

Lorsqu'on parle de "géomembrane", on sous-entend implicitement "Dispositif d'Étanchéité par géomembrane" (DEG) qui comprend généralement des géotextiles (ou produits apparentés) au niveau de la structure de protection ou de la structure support et qui peut comprendre également des matériaux granulaires. Il est évident que le contrôle porte sur l'ensemble de la mise en oeuvre de ces matériaux et il est d'ailleurs malheureusement fréquent que les dégradations de la géomembrane les plus importantes se fassent lors de la mise en oeuvre des structures de protection en couches granulaires.

Les contrôles de mise en oeuvre consistent à vérifier visuellement si les règles de mise en oeuvre sont respectées (support, soudures, ...). Ces règles de mise en oeuvre qu'il convient de spécifier dans le marché sont mentionnées dans le document « Étanchéité des barrages par géomembrane » [8] dans les documents de recommandations du CFG [3] [7], et/ou celles du Guide SETRA/LCPC [2].

3.2.1. Réception des géomembranes

- Conditions de livraison, manutention, stockage
- étiquetage des rouleaux et panneaux ; par exemple bien vérifier si la référence commerciale correspond exactement à celle de la fiche de certification
- marquage des produits eux-mêmes
- tenue du registre d'approvisionnement (date, n° lot, quantité)
- fiche de contrôle usine (éventuellement)
- prélèvements pour essais (Cf. § 2.2).

3.2.2. Réception des matériaux granulaires (éventuels) (pour mémoire)

- Nature, identification des produits (conformité à la commande),
- examen visuel,
- tenue du registre d'approvisionnement (date, n° lot, provenance, quantité),
- vérification des fiches de contrôle de fabrication,
- prélèvements pour essais.

3.2.3. Réception des supports

- Portance (essais sommaires de "praticabilité" ou essai de plaque ou dynaplaque si nécessaire),
- géométrie générale ou spécifique (tranchée d'ancrage) ; planéité,
- aspérités et autres éléments poinçonnants indésirables,
- continuité du support (cas de matériaux "trop ouverts"),
- compacité (essai pénétrodensitographe ou gamma densimètre si nécessaire),
- traitements de points singuliers (zones de transition pour le raccordement aux ouvrages rigides en béton).

3.2.4. Mise en oeuvre de la géomembrane

- Plan de calepinage ; moyens de manutention, organisation du chantier et mode de circulation des engins,
- matériel, matériaux et modalités d'assemblage (soudures),
- suivi des essais de convenance de soudure,
- conditions générales de pose : propreté des matériaux, température, humidité,
- protection contre le vent.

3.2.5. Contrôle des joints soudés et des points singuliers

- Contrôle des joints réalisés lors des essais de convenance, essais normalisés de résistance mécanique en pelage et cisaillement (facteur de soudure), largeur de chaque cordon de soudure, continuité de la soudure et absence de carbonisation s'il s'agit de géomembranes translucides,
- essais sommaires non normalisés des soudures à chaque reprise de poste,

- prélèvements destructifs en partie courante et essais mécaniques de traction/pelage et traction/cisaillement,
- essai de continuité des soudures à la pointe (émoussée),
- essais non destructifs de continuité par mise en pression hydraulique (liquide coloré) ou pneumatique du canal central des doubles-soudures,
- essais de continuité par dépression d'air (cloche à vide) des croisements de soudures (points triples),
- essais non destructifs de continuité par ultra-sons des soudures larges de géomembranes bitumineuses.

Les tableaux n^{os} 1 et 2 en annexe 2 tirés du Guide SETRA/LCPC [2] donnent pour les joints respectivement des spécifications de valeurs en fonction de la nature de la géomembrane et des fréquences d'essais ; ils comportent également des suggestions de répartition de ceux-ci entre les contrôles intérieurs et extérieurs à l'entreprise, en différenciant le cas où le personnel qui effectue les soudures est certifié ou non. On peut noter :

- qu' en l'absence de norme, divers documents (CFG, ADEME) [3], [4] peuvent mentionner des spécifications sensiblement différentes ;
- que logiquement ces spécifications peuvent être inférieures à celles qui sont exigées lors de la certification ASQUAL des soudeurs ;
- que ces spécifications et les fréquences de contrôle, constitue une illustration standard de ce qui peut être fait ; ceci pouvant être affiné avec plus ou moins de sévérité en fonction du contexte du projet ;
- que chaque fois que c'est possible (membrane non exposée aux UV), l'utilisation d'une membrane translucide (PVC, polyoléfine) permet un contrôle de continuité des soudures d'une très grande efficacité (visuel et liquide coloré sous pression) ;
- que pour l'examen des points singuliers, par exemple pour les raccordements de la géomembrane aux ouvrages bétons, il convient de contrôler le respect des différentes modalités prévues au projet et la continuité si possible à la cloche à vide.

3.2.6. Examen de la géomembrane avant mise en oeuvre des couches de protection (éventuelles)

- examen visuel des percements ou par méthode électrique (avec film d'eau)
- plissements

3.2.7. Mise en oeuvre de structures de protection (couches granulaires, béton bitumineux, béton hydraulique)

- vérifier (planche d'essai/essais de convenance) que les modalités de mise en oeuvre (circulation d'engin, modalités de compactage, épaisseur) ne sont pas agressives pour la géomembrane
- contrôle permanent des modalités de mise en oeuvre et des épaisseurs

3.2.8. Évaluation globale de la fonction étanchéité du Dispositif d'Étanchéité par Géomembranes (DEG)

Vérification de l'étanchéité globale si c'est techniquement possible et si prescrit au marché par :

- méthode électrique,
- remplissage de l'ouvrage.

4. Organisation générale de l'assurance qualité et du contrôle qualité

Dans le texte ci-avant, on a décrit les phases de travaux, qui doivent faire l'objet d'un contrôle, les méthodes et les critères d'évaluation relatifs à ces contrôles ; pour la répartition des tâches de contrôle entre les différents acteurs, pour ce métier comme dans d'autres du Génie-Civil, un transfert partiel s'est opéré du maître d'oeuvre ou d'ouvrage ("contrôle extérieur") vers l'entreprise ("contrôle intérieur").

L'efficacité de l'ensemble du contrôle est liée à une bonne définition en amont du schéma d'organisation, car dès la consultation des entreprises, celles-ci doivent connaître évidemment les prestations de contrôle intérieur qu'elles ont à inclure dans leur prix.

L'organisation de gestion de la qualité pourra être assez différente selon le type et la taille du chantier, suivant que l'entreprise d'étanchéité est pilote et sous-traite quelques travaux de terrassements ou, à l'inverse, si dans le cadre d'un chantier important l'étanchéité est un des multiples sous-traitants d'une entreprise générale de gros oeuvre (ou d'un groupement d'entreprises) ; ci-après, sont rappelées quelques phases de cet ordonnancement, qui pourra ainsi être fortement modulé et simplifié en fonction du contexte (une description plus complète est décrite dans les documents [2], [3]) :

- au niveau du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE) :

- . définition par le maître d'ouvrage de la Qualité d'Usage, en terme d'objectifs (niveau d'étanchéité) et de garantie ;
- . définition par le maître d'oeuvre de la Qualité Requise en terme de spécifications de produits, de mise en oeuvre (définition du DEG, des caractéristiques des joints, ...) et de programme minimum de contrôle de l'entreprise (nature, fréquence, ...) ;

- à la remise des offres, l'entreprise remet son SOPAQ (schéma organisationnel de la Qualité) qui donne les grandes lignes permettant au maître d'oeuvre de s'assurer que les moyens (matériel, personnel, doctrine technique) prévus correspondent aux exigences et aux spécifications du DCE ;

- après le choix de l'entreprise et pendant la phase de préparation de chantier :

. l'entreprise remet son Plan d'Assurance Qualité (PAQ) spécifique au chantier : moyen en personnel (et leur qualification), leur rôle dans la gestion de la qualité, matériel, produits (et leur qualification), procédures d'exécution spécifiques, plan et méthodes utilisées pour le contrôle des tâches, répartition entre Contrôle "Interne" et "Externe",

. le maître d'œuvre prépare son Schéma Directeur de la Qualité qui valide le planning général, vérifie la cohérence et la coordination entre les Plans d'Assurance Qualité des différentes entreprises et définit son Contrôle Extérieur en cohérence avec le PAQ de l'entreprise et en particulier il fixe les points CRITIQUES et les POINTS D'ARRET ; en Annexe 3, on donne un exemple de cette organisation.

5. Conclusions

Si on ne veut pas gâcher les potentialités de ce métier (relativement) neuf, une grande importance doit être accordée à l'assurance et la gestion de la qualité. Cette présentation donne des éléments pour une organisation générale de celle-ci des méthodes et des critères pour réceptionner les produits utilisés et les travaux.

Au cours de ces dix dernières années, les acteurs concernés de la profession et les maîtres d'ouvrage ont fait un gros effort dans ce sens : normalisation, publications et surtout certification ASQUAL des produits et personnels.

Un gros effort reste à faire au niveau de la qualité des projets car pour de nombreux usages (et c'est le cas des barrages), on manque de moyens objectifs, efficaces et publiés de dimensionnement des dispositifs, voire de choix des produits ;

un maître d'œuvre qui choisit un produit certifié aura la satisfaction, par exemple, que l'épaisseur du produit livré sera bien celle du produit commandé, mais c'est globalement très insatisfaisant s'il s'est trompé grossièrement sur le dimensionnement de l'épaisseur.

Bibliographie

[1] Etanchéité des Ouvrages Souterrains – 1992 - *Fascicule 67-III du Cahier des Clauses Techniques Générales applicables aux marchés publics*

[2] Etanchéité par Géomembrane des Ouvrages pour les eaux de ruissellement routier - 2000 - *Guide Technique SETRA/LCPC*

[3] Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les Centres de Stockage de déchets - 1995 - *Fascicule n° 11 du CFG (Comité Français des Géosynthétiques)*

[4] Dispositifs d'Etanchéité et de drainage par géosynthétiques dans les Centres de Stockage de Déchets – 1996 – *Guide Technique ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie)*

[5] *Norme NF G 38-060* - Recommandations pour l'emploi des géotextiles et produits apparentés - Mise en oeuvre – Spécifications – Contrôle des géotextiles et produits apparentés

[6] *Norme NF EN 13254* – septembre 2001 – Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques, requises pour l'utilisation dans la construction de réservoirs et de barrages

[7] Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géomembranes – *Fascicule n° 10* – Comité Français des Géosynthétiques

[8] Etanchéité des barrages par géomembranes – 1991 – Commission Internationale des Grands Barrages

Géotextiles et produits apparentés utilisés dans la construction des réservoirs et des barrages - Fonctions, caractéristiques liées aux fonctions et méthodes d'essai à utiliser.

Caractéristiques	Méthode d'essai	Fonction			
		Filtration	Séparation	Renforcement	Protection
(1) Résistance à la traction ^{b)}	EN ISO 10319	H	H	H	H
(2) Allongement sous charge maximale	EN ISO 10319	A	A	H	H
(3) Résistance à la traction des soudures et joints	EN ISO 10321	S	S	S	S
(4) Poinçonnement statique (essai CBR) ^{a), b)}	EN ISO 12236	S	H	H	(voir efficacité de la protection)
(5) Résistance à la perforation dynamique (chute de cône) ^{a)}	EN 918	H	A	H	H
(6) Caractéristiques en frottement (méthode du cisaillement direct)	prEN ISO 12957-1:1997 et prEN ISO 12957-2:1997	S	S	A	S
(7) Fluage en traction	EN ISO 13431	-	-	A	-
(8) Endommagement à la mise en œuvre	ENV ISO 10722-1	A	A	A	A
(9) Efficacité de la protection	prEN 13719:1999	-	-	H?	H
(10) Ouverture de filtration caractéristique	EN ISO 12956	H	A	-	-
(11) Perméabilité perpendiculaire au plan	EN ISO 11058	H	A	A	-
(12) Durabilité	Conformément à l'annexe B	H	H	H	H
(12.1) Résistance aux agents climatiques	EN 12224	A	A	A	A
(12.2) Résistance au vieillissement chimique	ENV 12447, ENV ISO 12960 ou ENV ISO 13438	S	S	S	S
(12.3) Résistance à la dégradation microbiologique	EN 12225	S	S	S	S
Pertinence :					
H : essentielle pour l'harmonisation					
A : s'applique à toutes les conditions d'utilisation					
S : s'applique à des conditions spécifiques d'utilisation					
"-": indique que les caractéristiques ne sont pas applicables à la fonction en question					
a) Il convient de considérer avec attention la validité de ces essais dont le principe peut ne pas être applicable à certains types de produits (par exemple les géogrilles)					
b) Si les propriétés mécaniques (traction et poinçonnement statique) sont indiquées H cela signifie que le producteur doit fournir les données pour ces deux propriétés. L'emploi de l'une seulement (résistance en traction ou poinçonnement statique) est suffisant dans la spécification.					

Tableau 1 - Spécifications des joints de géomembranes

	Bitumineux BO : bitume oxydé BP : bitume polymère	Thermoplastiques		Elastomères (EPDM)
		PEHD	Autres (PVC,PP-F)	
Type de joint (soudure)	Simple	Double		Simple
Mode de réalisation	Fusion par flamme	Automatique Air ou coin chaud		Collage Vulcanisation
Largeur minimale (mm)	≥ 150 (BO) ≥ 120 (BP)	(≥ 2 x 12)		≥ 100
Résistance mécanique • Cisaillement - Mode de rupture - Résistance (N/mm) - Facteur de soudure	DHS ou ≥ 9 N/mm (BO) ou ≥ 13 (BP)	Déchirure hors de la zone soudée (DHS) ≥ 90 % ≥ 50 %		> 5 N/mm
• Pelage - Mode de rupture - Résistance (N/mm) - Facteur de soudure	à titre indicatif BO : 0,5 - BP : 3	Déchirure hors de la zone soudée (DHS) 55 % PVC : 6 PP-F : 6		≥ 1,2

Les commentaires de ce tableau sont mentionnés dans le document [2]
Cas de poseurs (soudeurs) certifiés ASQUAL (ou certification reconnue équivalente)
Les valeurs sont des Valeurs Minimum Exigibles (VME)

Tableau 2 - Contrôle des joints

			Contrôle intérieur		Contrôle	Fréquence des contrôles	
			Inter-ne	Externe	Extérieur	Poseur CERTIFIE	Poseur NON CERTIFIE
JOINTS EN PARTIE COURANTE	CONTOLES DESTRUC-TIFS	ESSAIS D'INFORMA-TION NON NORMALISES . Qualitatif	X			Chaque prise de poste 200 ml 100 ml	
		. Quantitatif		X			
	(essais de pelage et de cisaillement)	ESSAIS NORMALISES			X	500 ml (≥ 1)	200 ml (≥ 1)
		NF P 84-502.1 et 84-502.2 *			X	500 ml (≥ 1)	200 ml (≥ 1)
CONTOLES NON DESTRU-CTIFS	. Qualitatif . Instrumental	X		X	- Systématique 3 sur 10	- Systématique 6 sur 10	
JOINTS PONTS SINGU-LIERS (croisement)	CONTOLES NON DESTRU-CTIFS	. Qualitatif . Instrumental	X		X	- Systématique 3 sur 10	- Systématique 6 sur 10
RACCORDE-MENTS AUX OUVRAGES BETONS	CONTOLES NON DESTRU-CTIFS	. Qualitatif . Instrumental	X	X	X	- Systématique 20 %	- Systématique 60 %

* par laboratoire accrédité COFRAC

Nota : Des précisions sur chacun des éléments de ces tableaux peuvent être trouvées dans le document (2)

Remarque : Pour chaque phase de contrôle, chaque catégorie d'intervenant, et chaque type de contrôle, les fréquences indiquées sont des minima recommandés.

PROGRAMME DE CONTROLE – NATURE ET RÉPARTITION DES TACHES

Dans le tableau ci-dessous, sont mentionnées la nature et la répartition des tâches de contrôles ; il faut bien noter qu'aux POINTS D'ARRÊT, l'entreprise a nécessairement besoin de l'accord du maître d'œuvre (ou son représentant) pour continuer les travaux.

Le document [2] précise la **nature des différentes opérations de contrôle et les fréquences conseillées**. Celles-ci sont fonction de l'importance de la surface de l'ouvrage, du nombre d'ouvrages dans un même lot de travaux, du phasage des travaux et de la sensibilité de l'ouvrage mais, doivent être largement renforcées si, pour une raison donnée, les stipulations suivantes n'étaient pas effectives :

- les matériaux utilisés sont CERTIFIÉS (ASQUAL ou équivalent).
- les soudeurs sont CERTIFIÉS (ASQUAL ou équivalent)
- les chefs de chantiers sont CERTIFIÉS (ASQUAL ou équivalent)

Nature des tâches	Points d'arrêt	Contrôle intérieur		Contrôle Extérieur						
		Interne	Externe							
1. Réception des matériaux										
1.1. Matériaux manufacturés		XX	X	X						
1.2. Matériaux granulaires de structure support et de protection		XX	X	X						
2. Réception des supports	<input type="checkbox"/>	XX	XX	XXX						
3. Contrôle de mise en œuvre des géomembranes										
3.1. Conditions générales										
3.2. Essais préalables de réalisation des joints.										
3.2.1. Essais de convenance en début de chantier	<input type="checkbox"/> *	X	XX	XX						
3.2.2. Essais de réglage en début de poste		XX	X	X						
3.3. Contrôles non destructifs des joints		XXX	XX	XX						
3.4. Contrôles destructifs sur joints										
- sur site (essais d'information)		X	XX							
- en laboratoire (essais normalisés)			XX	XX						
3.5. Traitement points singuliers (raccordement sur ouvrages ...)		XX	XX	XX						
3.6. Examen de la géomembrane avant recouvrement.	<input type="checkbox"/>	X	XX	XXX						
4. Mise en œuvre de la protection		XX	X	XX						
5. Examen et évaluation du DEG global			X	XX						
<input type="checkbox"/> Point d'arrêt <input type="checkbox"/> * Point d'arrêt si chef de chantier et/ou soudeur non certifiés et/ou suivant l'importance du chantier		<table border="1"> <tr> <td>X</td> <td>Intervention normale</td> </tr> <tr> <td>XX</td> <td>Intervention soutenue</td> </tr> <tr> <td>XXX</td> <td>Intervention très soutenue</td> </tr> </table>			X	Intervention normale	XX	Intervention soutenue	XXX	Intervention très soutenue
X	Intervention normale									
XX	Intervention soutenue									
XXX	Intervention très soutenue									

Dans le document [2] sont mentionnés des commentaires complémentaires à ce tableau.

Méthodes de détection et de localisation de défauts dans les géomembranes

Leak detection and location systems in geomembranes

Nathalie TOUZE-FOLTZ
Cemagref

Unité DEAN, BP 44, 92163 ANTONY Cedex, tel : 01 40 96 60 39,
Fax : 01 40 96 62 70, E-mail : nathalie.touze@cemagref.fr

Résumé : On présente les différentes méthodes électriques et par ultrasons permettant de détecter des défauts dans les géomembranes. Après une définition du terme défaut, on définit pour chacune des méthodes présentées le principe de fonctionnement et de calibration, les conditions d'application, les limites particulières d'utilisation, la facilité de mise en œuvre, les types d'informations et de résultats obtenus ainsi que des informations sur la sensibilité de la méthode. Ces différentes méthodes sont applicables aux géomembranes non conductrices pour les méthodes électriques (polypropylène, polyéthylène, polychlorure de vinyle, bitumineuses) et aux géomembranes en polyéthylène haute densité et bitumineuses pour la méthode par ultrasons.

Abstract : *Different electrical and ultrasonic leak detection systems are presented allowing to detect holes in geomembranes. A definition of the word hole is given first. Then, the measurement principle of each system is given, together with the calibration protocol, the conditions of use, the installation feasibility, the limits of validity, the description of results obtained and the way they are presented, the method sensitivity. Electrical methods are applicable to non-conductive geomembranes (polypropylene, polyethylene, polyvinylchloride, bituminous) and ultrasonic methods to high density polyethylene and bituminous geomembranes.*

Mots-clés : géomembrane, défaut, détection, méthode électrique, ultrasons

Keywords : *geomembrane, hole, detection, electrical method, ultrasonic*

Introduction

Dans un contexte d'utilisation de plus en plus prononcée des étanchéités par géomembranes en génie civil, la détection et la localisation de défauts dans les géomembranes s'avèrent devenir des étapes incontournables pour confirmer l'efficacité de l'ouvrage, sa pérennité, ainsi que la protection de l'environnement associée à l'utilisation de l'ouvrage.

L'objectif de cet article est d'informer sur les différentes méthodes de détection de défauts dans les géomembranes existantes reposant sur des principes électriques ou sur l'utilisation d'ultrasons. Ce document est largement inspiré des réflexions menées au sein du groupe de travail "Méthodes de détection de défauts dans les géosynthétiques" du Comité Français des Géosynthétiques qui est en phase de rédaction d'un guide de synthèse sur les méthodes de détection de défauts dans les géomembranes à paraître d'ici fin 2002.

Après une définition des défauts dans les géomembranes, on présente différentes méthodes de détection de défauts ainsi que les contraintes afférentes à leur utilisation.

Ainsi, on souhaite faciliter le choix d'une méthode de détection de défauts en relation, en particulier, avec le degré de fiabilité de l'étanchéité, le moment où la détection de défauts peut être effectuée par rapport au moment de la pose de la géomembrane. Sont également prises en compte l'évolution de l'ouvrage et les contraintes d'utilisation des différentes méthodes.

A noter qu'une inspection visuelle de la géomembrane est un contrôle préalable ou complémentaire des méthodes présentées ici. Ainsi, le contrôle visuel permet de vérifier la largeur, la continuité et l'homogénéité du cordon pour les soudures manuelles. Pour les doubles soudures automatiques, il permet la vérification locale de la non obstruction du canal central.

1. Qu'est-ce qu'un défaut ?

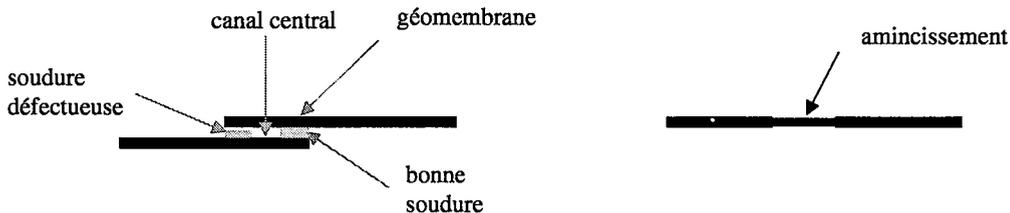
Le terme défaut est utilisé pour désigner une non continuité de la géomembrane : un trou circulaire, un poinçonnement, une déchirure, une coupure, une soudure défectueuse, une fissure ou tout autre endommagement sur toute ou partie d'une géomembrane, pendant ou à l'issue de sa pose.

Un **défaut sans fuite** désigne :

- ↳ une non continuité dans la géomembrane qui ne génère pas de flux de liquide ou de gaz dans le cas où la géomembrane est sollicitée hydrauliquement ou soumise à un gradient de pression entre ses deux faces. Typiquement, un tel défaut sans fuite correspond à une soudure défectueuse sur uniquement un des deux joints parallèles d'une double soudure (voir Figure 1) ;
- ↳ une réduction d'épaisseur de la géomembrane causée par un écrasement ou un poinçonnement.

Un **défaut avec fuite** désigne quant à lui une non continuité de la géomembrane qui génère un flux de liquide ou de gaz lorsque la géomembrane est soumise à un gradient de pression entre ses deux faces.

Défauts sans fuite



Défaut avec fuite



Figure 1 : exemples de défauts sans fuite et avec fuite

2. Présentation des différentes méthodes de détection et de localisation de défauts électriques et par ultrasons

Les différentes méthodes de détection et de localisation de défauts présentées dans la suite appartiennent aux méthodes dites électriques, ou utilisant des ultrasons. Pour chacune d'entre elles la présentation s'articule autour des points suivants : principe de fonctionnement et calibration, conditions d'application, limites particulières d'utilisation, facilité de mise en œuvre, types d'informations et de résultats, sensibilité.

2.1. Méthodes électriques

Le principe physique des méthodes électriques est de créer une différence de potentiel entre les deux faces de la géomembrane testée, et ensuite de localiser les endroits où le courant électrique peut circuler à travers les défauts de la géomembrane. Les géomembranes conductrices, en EPDM par exemple, ne peuvent pas être testées par ces méthodes.

2.1.1 Géomembrane conductrice

On utilise des géomembranes PEHD conductrices. Cette méthode doit donc être intégrée à la conception de l'ouvrage dans la mesure où elle nécessite la mise en place d'une géomembrane conductrice. Les géomembranes conductrices comportent une couche supplémentaire coextrudée, d'environ 0,1 mm d'épaisseur, sur leur face inférieure. Cette couche est électriquement conductrice grâce à l'addition d'un fort taux de noir de carbone. Avant le démarrage de la prospection, la couche conductrice est chargée par induction par une unité de tension (15 à 30 kV) comme indiqué à la figure 2. La face supérieure, non conductrice, est alors prospectée à l'aide d'un balai électrique. Tout défaut de la géomembrane génère une étincelle visible ainsi qu'un signal sonore (Adams, 1997).

Toutes les géomembranes conductrices peuvent être testées. Les lés, soudures, points singuliers (jonction avec des éléments extérieurs mais non métalliques) peuvent être prospectés. Cette méthode peut être appliquée sur des produits exposés, lors de leur pose, ou après achèvement de celle-ci si la géomembrane est sèche. Sous réserve que la géomembrane soit apparente, propre et sèche, cette méthode peut être envisagée au cours de la vie de l'ouvrage. Elle est déconseillée par temps de pluie. Par contre, la poussière ou les impuretés non conductrices ainsi que la présence de champs électriques périphériques n'affectent pas le test.

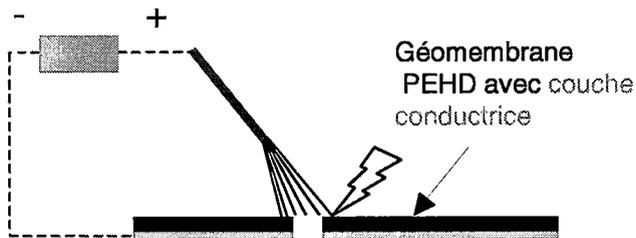


Figure 2 : Schéma de principe de la méthode géomembrane conductrice

Un contrôleur interne ou externe peut sans formation particulière effectuer la prospection. Le temps de mise en oeuvre est immédiat dès lors que la géomembrane est prête à être testée. Le temps de mesure est lui aussi immédiat tout comme la durée d'interprétation des résultats. La vitesse de prospection est de l'ordre de 1000 à 5000 m² par jour, pour un appareil et une équipe.

Cette méthode permet de localiser des défauts de moins de 1mm de diamètre. Précision, fiabilité, répétabilité dépendent de l'opérateur puisque les défauts sont repérés visuellement et auditivement.

2.1.2 Lance à eau

Cette technique de prospection repose sur l'utilisation d'un jet d'eau et sur les propriétés d'isolant électrique de la géomembrane (Rollin & Jacquelin, 1998).

Pour les mesures, on utilise deux électrodes, l'une mise à la terre dans le sol support de l'ouvrage, l'autre placée sur la lance à eau ou sur le balai. Les deux électrodes sont reliées à une source de courant continu 12 ou 24 volts (Rollin et Jacquelin, 1998).

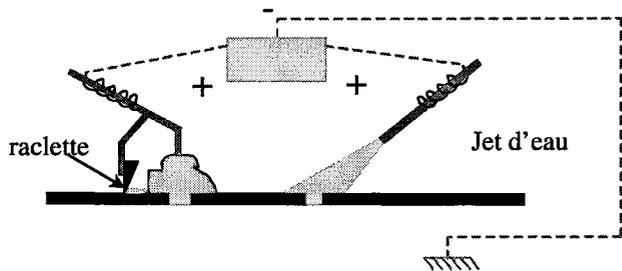
L'alimentation en eau peut être fournie :

- ↳ par une citerne ;
- ↳ par un circuit fermé. Dans ce cas, une pompe placée au point bas du site permet la réutilisation des eaux de détection. Cela ne s'applique qu'aux sites possédant une géométrie adéquate ;
- ↳ par un réseau existant ayant une pression suffisante.

L'opérateur déplace la lance à eau sur la zone à prospector (voir Figure 3). Lorsque l'eau rentre en contact avec le sol chargé négativement du fait d'un défaut, le circuit entre la lance et le sol se ferme, engendrant une augmentation du signal électrique (Swyka et al., 1999). Un signal sonore avertit l'opérateur de la présence du défaut.

Pour s'assurer du bon fonctionnement des appareils, des tests de vérification doivent être faits régulièrement au cours des mesures. On peut simplement à simuler une fuite en mettant le bout de la lance en contact avec le sol.

Figure 3 : Schéma de principe de la méthode géo-électrique dite du « jet ou de la flaque d'eau »



Toutes les géomembranes non conductrices (F-PP, PEBD, PEHD, PVC-P, bitumineuses) peuvent être testées. Les lés, soudures, points singuliers (jonction avec des éléments extérieurs mais non métalliques) peuvent ainsi être prospectés.

Cette méthode s'applique aux produits non recouverts pendant ou après la pose de la géomembrane, mais également au cours de la vie de l'ouvrage si on ne rencontre pas de problèmes de conductivité électrique (voir limites particulières d'utilisation) et que la géomembrane est propre.

Lorsque la géomembrane est installée ou que la pose de la géomembrane se fait de l'aval vers l'amont, il est préférable de commencer la détection des fuites par les zones les plus basses. En effet, les eaux de détection s'écoulant naturellement vers des points bas, si des fuites existent, elles vont engendrer un bruit de fond qui va perturber les mesures. De plus, pour localiser ces fuites, il faudra vider ces zones. Lorsque la pose de la géomembrane se fait de l'amont vers l'aval, la détection se fait une fois les travaux de soudure terminés.

Cette méthode n'est pas recommandée par temps trop humide, pluvieux ou de gel.

L'alimentation en eau peut être un facteur limitant de l'utilisation de cette méthode. Sur les pentes, l'opérateur doit pouvoir se tenir debout, le film d'eau doit être suffisamment important pour permettre la mesure. De plus, les matériaux sous la géomembrane doivent être conducteurs. Pour que la détection puisse être opérée, il doit y avoir un bon contact entre la géomembrane et le sol (pas de plis).

Le temps de mise en oeuvre est de l'ordre de la demi-journée. Le temps de mesure est immédiat et la durée d'interprétation des résultats reste inférieure à 10 minutes (recherche du défaut dans la zone suspecte). La vitesse de prospection dépend du type de géomembrane, du débit d'eau disponible, de la géométrie du site, de la présence de plis ou d'objets sur la géomembrane. Cette vitesse de prospection est de l'ordre de 200 à 300 m² par heure et par opérateur, une journée est nécessaire à la formation de l'opérateur.

Cette méthode permet de localiser des défauts avec fuite. Des défauts de diamètre minimum égal à 1 mm peuvent être détectés (Rollin & Jacquelin, 1998). La sensibilité de cette méthode dépend surtout de la hauteur d'eau imposée sur la géomembrane.

Cette méthode de détection impose le passage d'un opérateur sur la géomembrane. Cela permet la détection non seulement des défauts mais également de faiblesses dans la géomembrane tels que des amincissements. Cette méthode est moins précise que d'autres méthodes électriques pour lesquelles on peut disposer de charges hydrauliques plus importantes comme celles qui sont présentées dans la suite.

2.1.3 Sonde mobile

Pour la méthode utilisant une sonde mobile, on utilise deux électrodes. La première est mise à la terre dans le sol support de l'ouvrage, la deuxième, sert à établir la différence de potentiel entre le sol extérieur et le milieu interne. Elle est

placée dans le matériau recouvrant la géomembrane. Les deux électrodes sont reliées à une source de courant continu.

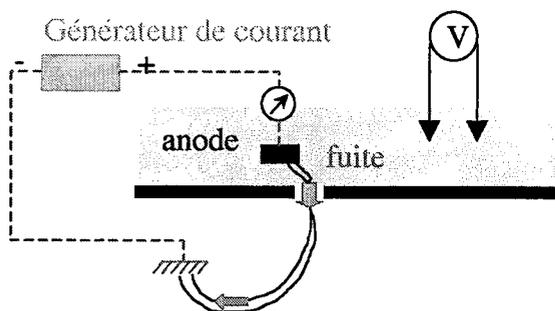


Figure 4 : Schéma de principe de la méthode par sonde mobile

A l'aide d'un multimètre mobile, on effectue des mesures de potentiel électrique suivant une densité prédéterminée. Un changement de signe dans les valeurs mesurées peut être une indication sur la proximité d'un défaut. Notamment, le champ de potentiel diminue quand on s'éloigne de l'électrode. Une augmentation de celui-ci indique donc la proximité d'un défaut. L'intensité du champ est maximale lorsque l'opérateur se trouve juste au dessus du défaut. Quand le défaut est à équidistance des électrodes, aucun gradient de potentiel n'est cependant détectable (Phaneuf & Peggs, 2001).

Une fois les courbes iso-potentielles tracées et l'interprétation des variations du champ faite, on peut localiser de façon précise les fuites et ainsi, dans la mesure du possible, les réparer.

Avant toute mesure, une étape de calibration est nécessaire. Elle s'effectue en trois étapes :

- ↳ calibrage de la zone à prospecter par une analyse préliminaire afin de quantifier le bruit de fond ;
- ↳ mesure du courant pour établir le niveau de sécurité ;
- ↳ simulation de défaut en utilisant une cellule de calibration ou en ayant connaissance d'un défaut de diamètre et de localisation connue (Peggs, 1996).

Toutes les géomembranes non conductrices (F-PP, PEBD, PEHD, PVC-P, bitumineuses) peuvent être testées. Les lés, soudures, points singuliers (jonctions avec des éléments extérieurs mais non métalliques) peuvent être prospectés. Cette méthode s'applique aux produits recouverts après achèvement de la pose mais également au cours de la vie de l'ouvrage si on ne rencontre pas de problèmes de conductivité électrique.

Dans le cas où la géomembrane est recouverte d'un liquide, la hauteur de celui-ci doit être comprise entre 0,1 et 1 m car au delà, la mobilité de l'opérateur est réduite.

Un temps humide et/ou une pluie légère sont des conditions favorables à l'utilisation de cette méthode, à l'inverse du gel. Par contre une pluie abondante est nuisible à l'instrumentation et l'isolation électrique de l'ouvrage.

Les matériaux de part et d'autre de la géomembrane doivent être conducteurs. Ainsi, par exemple, un sol sec recouvrant une géomembrane devra subir une humidification préalable. D'autre part, les matériaux recouvrant la géomembrane (eau, boue, sable, terre, granulats, argile, déchet) doivent être, le plus possible, isolés électriquement du sol extérieur et contenir le moins possible d'éléments métalliques (Peggs, 1996).

Il faut également faire attention aux effets de bords, créés par les pontages électriques des matériaux entre le dessus et le dessous de la géomembrane, si le matériau contenu dans l'ouvrage forme une couche continue en contact avec le sol extérieur.

Cette méthode est mise en oeuvre par des entreprises spécialisées qui ne la délèguent pas, car elle requiert un niveau élevé de qualification.

Le temps de mise en oeuvre est de l'ordre de la demi-journée. Le temps de mesure est immédiat, la durée d'interprétation des résultats est également inférieure à 10 minutes (recherche du défaut dans la zone suspecte).

La vitesse de prospection dépend du type de matériau recouvrant la géomembrane, de l'alimentation en eau dans le cas d'une humidification préalable nécessaire, de la géométrie du site et des conditions climatiques. Elle est de l'ordre de 150 à 250 m² par opérateur et par heure.

Cette méthode permet de localiser des défauts avec fuite. Des défauts de moins de 1mm de diamètre (trous d'épingle) peuvent être détectés (Peggs, 1996).

La sensibilité de cette méthode dépend de :

- ↪ la visibilité des perturbations engendrées par le défaut dans le champ de potentiel établi dans le sol (signal du défaut par rapport au bruit de fond ou à une anomalie connue comme la localisation d'un drain) ;
- ↪ l'intensité du courant traversant le défaut : plus l'intensité du courant est élevée, plus le signal produit par le défaut est fort, meilleure est donc la sensibilité de détection ;
- ↪ la qualité des mesures : sensibilité du multimètre, stabilisation du signal, etc...;
- ↪ la taille du maillage, qui est un paramètre très important de la mesure, car un maillage trop large ne permettra peut être pas de mettre en évidence deux défauts voisins ;

- ↳ la résistivité électrique des matériaux situés de part et d'autre de la géomembrane ainsi que de leur homogénéité et de leur épaisseur (Darilek & Laine, 1999) ;
- ↳ la nature du matériau recouvrant la géomembrane (un liquide permet une meilleure conductivité et améliore de ce fait la sensibilité) (Swyka et al., 1999).

La résolution de cette technique est directement liée à la taille du maillage. Afin d'éviter qu'un défaut échappe à l'opérateur, l'espace entre les profils de tests ne doit pas être de plus de 2 mètres. Il est donc conseillé d'effectuer un maillage le plus fin possible autour des zones de fuite. La résolution peut également être augmentée en maximisant la conductivité des matériaux recouvrant la géomembrane par un arrosage abondant (la charge hydraulique augmente l'efficacité).

Les résultats sont présentés sous la forme d'un plan de calepinage avec récolement des défauts repérés.

2.1.4 Système fixe de détection de localisation et d'alarme

L'intérêt majeur de cette méthode réside dans le fait qu'elle permet une surveillance de l'étanchéité en service, pendant plusieurs années. Cette méthode doit être prévue préalablement à la construction de l'ouvrage, car elle nécessite l'installation des capteurs sous la géomembrane. Elle est utilisable au cours de la vie de l'ouvrage.

Des capteurs sont placés dans le sol sous la géomembrane, à faible profondeur (voir figure 5). Ces capteurs sont positionnés selon une grille modélisée au préalable. Chaque capteur est relié par un câble électrique à un boîtier de contrôle situé à proximité de l'ouvrage. Après la pose de la géomembrane et de la couche de protection, une source électrique est installée : une électrode active est placée au-dessus de la géomembrane et une autre passive est mise à la terre dans le sol support de l'ouvrage (figure 5). Un courant peut alors être appliqué. La densité de courant sous la géomembrane est ainsi mesurée par les différents capteurs et toute anomalie électrique proviendra d'un défaut de celle-ci (Nosko & Ganier, 1999).

L'ensemble des mesures est envoyé par liaison téléphonique (fax-modem, e-mail) au centre d'interprétation. Les éventuels défauts sont ainsi détectés et localisés. Le logiciel développé pour l'interprétation des données prend en particulier en compte :

- ↳ la géométrie du site,
- ↳ le type d'étanchéité (simple ou double),
- ↳ la nature du support (terre, béton, sable, ...),
- ↳ la nature de la couche de protection (liquide, sable, ...),
- ↳ les systèmes de drainage eau et gaz sous ou sur la géomembrane.

Le logiciel fournit dès lors le nombre de capteurs nécessaires, la localisation de celle-ci, le nombre de mètres linéaires de fil électrique, le nombre et la position des boîtes électriques. La distance entre deux capteurs peut varier de 6 à 12 m.

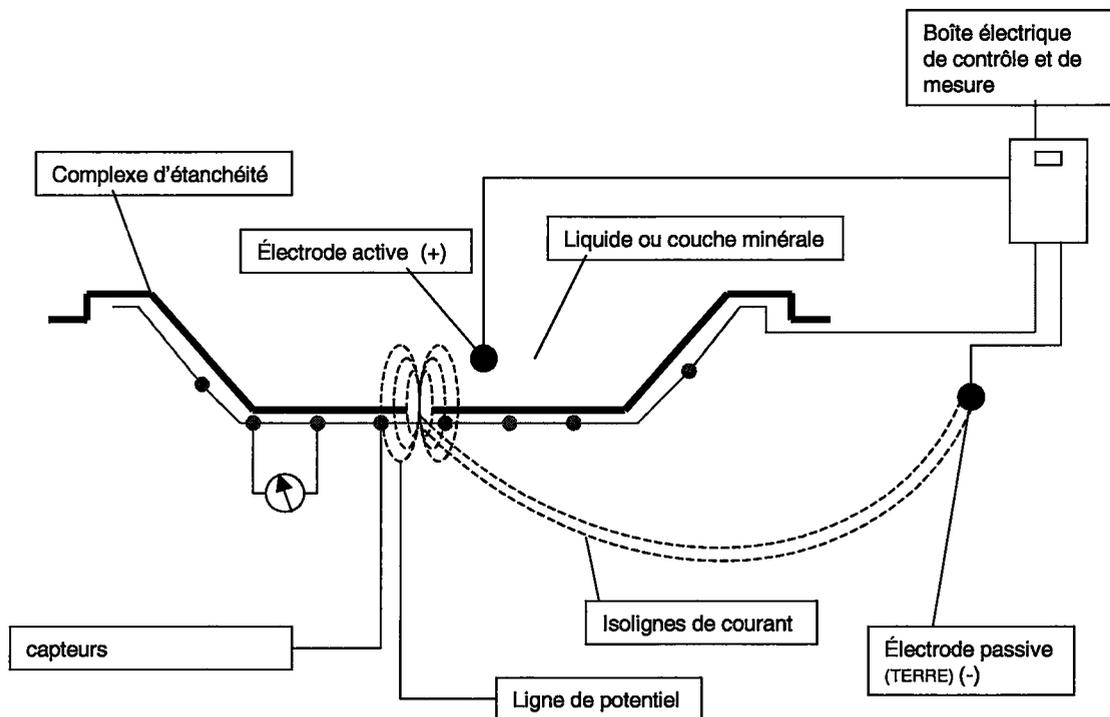


Figure 5 : Schéma de principe de la méthode Système fixe de détection, de localisation et d'alarme

Toutes les géomembranes non conductrices (F-PP, PEBD, PEHD, PVC-P, bitumineuses) peuvent être testées. Les lés, soudures, points singuliers peuvent être prospectés.

Cette méthode s'applique aux produits en utilisation ou recouverts. Par fortes pluies, les bords de la géomembrane étant mouillés, la polarisation électrique du site est difficile. Par temps sec, les petits défauts sont difficilement localisables suite aux modifications de la conductivité électrique du sol.

Un géotextile intercalé entre la géomembrane et le sol support peut faciliter la mesure car il permet une bonne circulation du liquide sous la géomembrane.

Les matériaux situés de part et d'autre de la géomembrane doivent être conducteurs et les plus homogènes possible.

La surface maximale testable est de 6000 m² environ par centrale de mesure (128 capteurs). L'ouvrage à tester ne doit pas être trop petit pour pouvoir respecter un espacement minimal de 2 mètres entre deux capteurs voisins et un nombre minimal de 36 capteurs.

Pour détecter l'ensemble des défauts, plusieurs mesures successives doivent être effectuées (compter trois mesures par site).

Pendant la phase de mesure, pour éviter les perturbations électriques, la circulation d'engins doit être évitée.

Des précautions particulières doivent être prises en ce qui concerne les points singuliers. En particulier il est recommandé que les conduites traversant les géomembranes non conductrices soient également constituées d'un matériau non conducteur afin d'éviter les anomalies électriques.

Cette méthode est appliquée par des entreprises spécialisées qui ne la délèguent pas car elle requiert un niveau élevé de qualification.

Le temps de mise en oeuvre est de 3000 à 4000 m² par jour et par équipe pour un espacement de 8 mètres entre capteurs. Il faut compter également une heure de calibration. Le temps de mesure est de 2 minutes par mesure pour 10000 m². La durée d'interprétation des résultats est de 2 heures par mesure.

Cette méthode permet de localiser des défauts avec fuite avec une précision de 15 % de l'espacement entre deux capteurs, soit typiquement de 0,5 à 1 m. La durabilité du système dépend de la qualité des capteurs et des conditions d'exploitation (durées garanties de 6 mois à 10 ans).

La taille minimale des défauts détectée est inférieure au millimètre.

Les résultats sont présentés sous la forme d'un rapport technique avec cartographie de la position des défauts.

2.2. Tests utilisant des ultrasons

Cette méthode repose sur l'utilisation d'une machine automatique, dont un seul modèle existe à l'heure actuelle à notre connaissance, comportant 24 capteurs d'ultrasons baignant dans un liquide conducteur. Elle permet de tester la qualité des soudures (Figure 6). Pour assurer la continuité entre l'appareil à ultrasons et la soudure à tester, une rampe vaporise de l'eau sur la géomembrane (Breul et al., 1998).

La machine progresse le long de la soudure testée (les soudures peuvent mesurer jusqu'à 20 cm de largeur, ce qui correspond à la largeur de la rampe de capteurs) en prenant une mesure tous les millimètres (dans la largeur). Chaque émetteur balaie une bande parallèle au sens de déplacement. Chaque bande est subdivisée

en rectangles virtuels (9 mm x 5 mm) afin de faciliter le traitement de l'information et son enregistrement (Breul et al., 1998).

Avant toute utilisation, l'émetteur/récepteur est réglé en utilisant une plaque métallique standard, d'épaisseur et d'impédance acoustique constante. La machine est ensuite calibrée par rapport à l'épaisseur de la géomembrane testée.

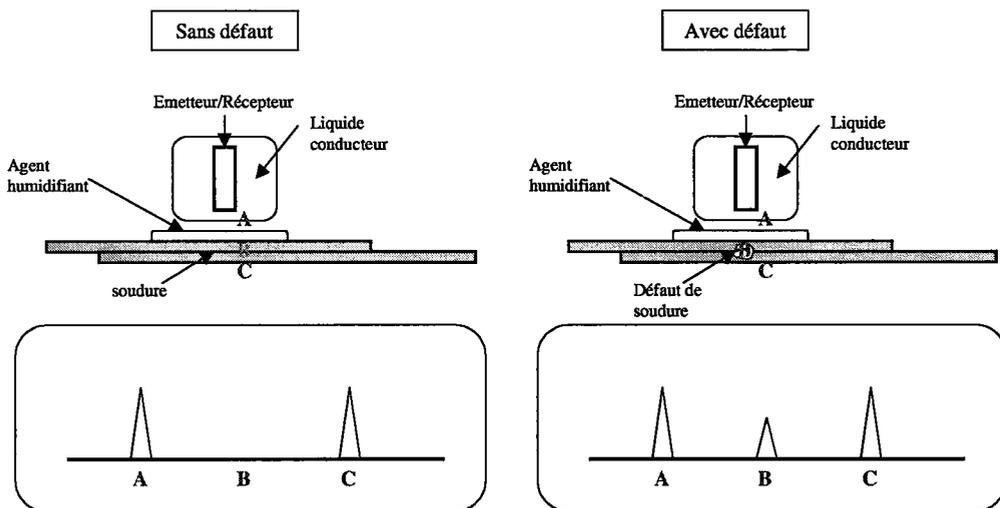


Figure 6: Schéma de principe de la méthode utilisant des ultrasons

Notons l'existence d'un appareillage portable permettant des contrôles manuels. Il comprend un appareil à ultrasons utilisant la bande de fréquence 1-3 MHz et un oscilloscope pour l'analyse.

Toutes les géomembranes sont a priori testables. Cependant seules les géomembranes bitumineuses et celles en PEHD ont été testées jusqu'à présent. Les soudures et les points singuliers réalisés manuellement peuvent être prospectés.

Cette méthode s'applique aux produits non recouverts lors de la pose ou après achèvement de celle-ci. L'utilisation au cours de la vie de l'ouvrage peut être envisagée si la membrane est propre et non recouverte ; celle-ci peut être humide.

La température ambiante ne doit pas dépasser 35°C sinon la machine, qui pèse 200kg environ, marque la géomembrane au niveau des pentes où la température va atteindre 60 à 70°C dans ces conditions.

La planéité de la soudure testée doit être au centimètre près. Les pentes doivent être suffisamment longues pour pouvoir utiliser la machine (20 m de rampant).

Cette méthode est appliquée par des entreprises spécialisées qui ne la délèguent pas car elle requiert un niveau élevé de qualification.

La calibration initiale nécessite une journée. La vérification quotidienne de la calibration nécessite une demi-heure.

Le temps de mesure est immédiat. L'interprétation des résultats peut être faite immédiatement ou reportée en fin de journée sur la base des résultats collectés ce qui permet en outre de vérifier si les réparations ont été effectuées.

La vitesse de contrôle est de l'ordre de 100 m par jour en plat avec la machine et de 20 à 80 m par jour avec l'appareil portatif.

Cette méthode permet de localiser des défauts avec ou sans fuite.

La résolution est de 5 mm². Cependant, le logiciel ne définit que les défauts d'au moins 1,5 cm² (Breul et al., 1998).

3. Conclusion

La synthèse présentée ici permet de présenter les différentes méthodes électriques et utilisant des ultrasons qui peuvent être utilisées pour effectuer des détections de défauts dans les géomembranes. On s'est également attaché à présenter leurs limites d'application. En particulier les méthodes électriques autre que la géomembrane conductrice ne sont applicables qu'aux géomembranes non conductrices. On a également pu noter qu'il était indispensable de prendre en compte des contraintes liées au site et aux conditions météorologiques pour une bonne performance des ces méthodes. Enfin le projet d'utiliser une de ces méthodes doit être précisé et raisonné préalablement à la pose de la géomembrane pour certaines d'entre elles et non sollicitée lors de la survenue d'un incident.

4. Bibliographie

Adams, M.W. (1997) - Application of Conductive Geomembranes in Containment Applications, Proceedings Sardinia'97, Sixth International Landfill Symposium; Christensen, Cossu and Stegmann Eds., Volume III, 57-63.

Breul, B., Carroget, J. et Herment, R. (1998) - Automatic ultrasound seam tester for bituminous geomembranes – Development and field results, Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, USA, 345-348.

Darilek, G.T. and Laine, D.L. (1999) - Performance-based specification of electrical leak location surveys for geomembrane liners, Geosynthetics '99, Boston, Massachussets, USA, April 28-30 1999, 645-650.

Nosko, V. & Ganier, P. (1999). Damage Detection System – The New Tool for In-Situ Testing of Integrity of Geomembranes: Comparison and Results, in Two days seminar of Landfill Interest Group, Institute of Waset management, 16 & 17 September 1999, Cape Town, South Africa.

Peggs, I.D. (1996) - Defect identification, leak location, and leak monitoring in geomembrane liners, in Proceedings of the first european geosynthetics conference, Geosynthetics : Applications, Design and Construction, Maastricht, Netherlands, 30 september – 2 october 1996, de Groot, den Hoedt and Termaat Eds., 611-618.

Phaneuf, R. and Peggs, I.D. (2001) - Landfill construction quality, Lessons learned from electrical resistivity testing of geomembrane liners, Geotechnical Fabrics Report, April 2001, 28-35.

Rollin, A.L. and Jacquelin, T. (1998) - Geomembrane Failures : Lessons Learned From Geo-Electrical Leaks Surveys, in Lessons learned from geomembrane failures by J.P. Giroud (to appear), 17 pages.

Swyka, M.A., Hullings, D., Losue, G. and Peggs, I.D. (1999) - Overview of landfill liner leak location technologies, Waste Technical Conference, New Orleans, LA, USA, Feb 1-2, 9 pages.

Les géotextiles dans les barrages

retours d'expérience

Geotextiles in dams feedback

Gérard DEGOUTTE
ENGREF 19, avenue du Maine 75732 PARIS Cedex 15
degoutte@engref.fr

Jean-Jacques FRY
EDF-CIH 73373 Le Bourget du Lac CEDEX
jean-jacques.fry@edf.fr

Résumé : Cet article, rédigé dans le cadre du Colloque Technique Géotextiles et Géomembranes dans les barrages, sous l'impulsion conjointe des Comités Français des Géosynthétiques (CFG) et des Grands Barrages (CFGB), a pour objectif de réactualiser le rapport présenté au colloque technique CFGB-CFG de 1996. Après un rappel de l'usage actuel des géotextiles dans les barrages et les ouvrages hydrauliques, la spécification des propriétés des géotextiles est évoquée. L'accent est mis sur le risque de colmatage et les solutions actuellement possibles.

Abstract : *This paper is written for the Technical Symposium on Geotextiles and Geomembranes in dams, held on the behalf of CFG and FCOLD. The purpose of this paper is to bring up to date experience compiled in the report presented in the previous symposium in 1996. After a short presentation of the current use of geotextiles in dams, specifications of geotextiles is developed. The risk of clogging and its management are underlined.*

Mots-clés : barrage, géotextile, filtration, drainage, séparation, colmatage

Keywords : dam, geotextile, filtration, drainage, separation, clogging

1. Introduction

1.1 Objectif

Avec un recul de 30 ans et avec le progrès dans la fabrication des matériaux, la mise en œuvre des normes, de la certification, de la conception et l'ingénierie, le géotextile apparaît comme un produit économique, pratique et très polyvalent. Le travail du projeteur consiste à exploiter l'expérience acquise et à garantir la qualité du produit et de sa pose. A cette fin, il doit analyser le fonctionnement du géotextile.

La France est l'un des premiers pays à avoir étudié le comportement des géotextiles dans les barrages. Ainsi, la première application au monde d'un géotextile dans les barrages fut réalisée sur l'initiative de J. P. Giroud, dans le département du Var, au barrage de VALCROS d'une hauteur de 17 m en 1970. L'Institut Textile de France, le CEMAGREF, l'IRIGM et le LCPC ont aussi conduit des études pilotes dont la synthèse a été entreprise par le CFGB (1982), le CFGG (1986) ou les deux comités (1996).

Ce rapport est une tentative de réactualisation, sous l'égide des deux comités, de la synthèse de 1996. Cette réactualisation est encore une version provisoire qui n'engage que les auteurs. Elle sera discutée et ensuite complétée au cours du colloque, le 19 juin 2002 et pourra faire l'objet de compléments et amendements en vue d'une approbation par les deux comités organisateurs.

1.2 Typologie

La définition des géotextiles employés dans les barrages est la suivante (d'après le projet de norme prEN10318 d'avril 2001) :

Géotextile : Matière textile, plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique), pouvant être nontissée, tricotée ou tissée, utilisée en contact avec le sol ou d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Les polymères les plus couramment utilisés sont le polypropylène, le polyéthylène et le polyester.

Géotextile nontissé : géotextile fait de fibres, de filaments ou d'autres éléments orientés directionnellement ou au hasard et liés de façon mécanique, thermique ou chimique. (L'aiguilletage donne une structure souple et déformable. Le thermocolage donne des géotextiles plus rigides et moins aptes à se déchirer).

Géotissé : géotextile produit par entrelacement d'un) ou plusieurs fils, filaments ou autres éléments.

(De par sa nature, le tissé est anisotrope et peu déformable. La résistance dépend de la masse surfacique et de la nature du polymère).

Géogrille : Structure plane à base de polymère constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction reliés entre eux selon un motif régulier et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants..

Géoespaceur : Structure tridimensionnelle à base de polymère conçue pour créer un espace d'air dans le sol et/ou dans d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Géocomposite : Matériau manufacturé et assemblé comprenant au moins un géosynthétique parmi ses composants.

Les caractéristiques mécaniques, thermiques initiales et leur évolution dans le temps sont différentes selon la nature des polymères utilisés, selon le procédé de filage et les additifs introduits. Par exemple, le polyéthylène a un point de ramollissement de 80°C, qui est nettement inférieur à celui des autres polymères. Le polyéthylène sous l'effet de la chaleur connaîtra donc un plus grand fluage. Les principaux polymères sont :

- le polyéthylène : PE ;
- le polypropylène : PP ;
- le polyester : PET ;
- le polyamide : PA.

La figure 1 présente la différence de propriétés mécaniques entre tissés et non tissés de polymères différents.

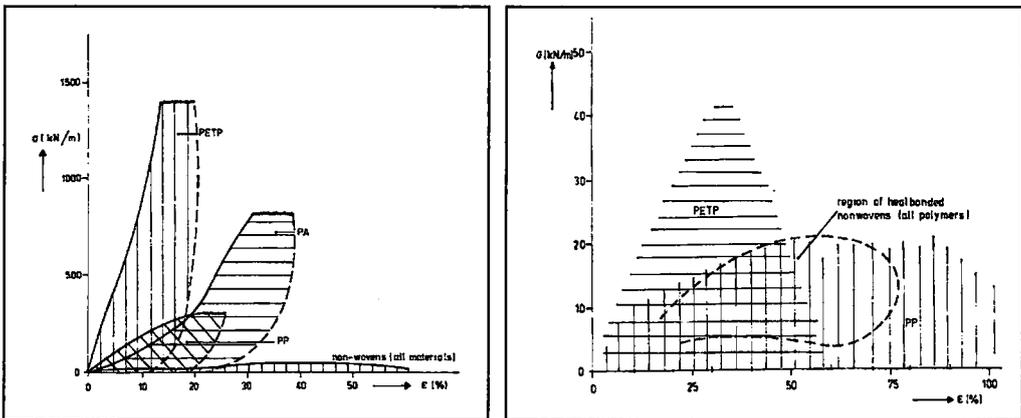


Figure 1 - résistance et déformabilité de géotextiles fonction du polymère des fibres (d'après CFGB-CFG, 1996)

1.3 Fonctions principale et secondaires des géotextiles

Un barrage est un système qui doit résister aux agressions du milieu extérieur. Ce système est constitué de composants : noyau, filtre, drain, recharge, protection extérieure. Le géotextile inséré dans un barrage va devenir un de ses composants.

Chaque composant a une fonction principale, ou une destination principale, appelée encore fonction de base. Parmi ces derniers, les fonctions principales des géotextiles sont :

1. la filtration ;
2. le drainage ;
3. le renforcement ;
4. le support anti-poinçonnement.

Le géotextile peut être un organe critique pour la sécurité. Dans ces conditions le niveau d'exigence doit être plus élevé.

Si pour satisfaire le rôle de filtre (ou de drain), il est évident que le géotextile doit avoir les qualités de filtration (ou de drainage), il doit être doté de certaines propriétés pour résister aux contraintes qui sont propres à son voisinage, c'est à dire au contact avec les autres parties du barrage, ou à l'environnement du barrage, ou plus généralement aux sollicitations exercées par le milieu extérieur sur le barrage. Par exemple, un géotextile posé lors d'un confortement de remblai, ayant une fonction de filtration sous une recharge aval, doit aussi satisfaire la fonction tenue au glissement.

Le composant doit avoir une réaction de défense contre toute action du milieu extérieur sur le géotextile. La définition de cette réaction est une fonction de conception. Les valeurs seuil des propriétés du géotextile et de son environnement qui caractérisent la fonction de conception constituent les spécifications fonctionnelles. L'exhaustivité et la précision de ces spécifications font la réussite de la conception.

Le dimensionnement d'un géotextile doit donc non seulement concerner la fonction principale, ou le rôle, qui est la raison d'être du géotextile dans l'application considérée, mais doit aussi posséder toutes propriétés nécessaires au bon fonctionnement global ou local du barrage.

1.4 Plan de l'article

Après ce chapitre dont l'objet est la présentation de la finalité de l'étude et un rappel des principales définitions de géotextile, trois autres chapitres sont consacrés à l'usage des géotextiles dans les barrages.

L'utilisation des géotextiles sera d'abord présentée au travers des rôles ou fonctions principales qui leurs sont dédiés. Depuis la première pose d'un géotextile dans le barrage de Valcros en 1970, l'usage de géotextiles dans les petits et

moyens barrages, mais également dans les grands barrages est devenue de plus en plus fréquente. Le chapitre 2 recense les principaux rôles joués par les géotextiles dans la construction de petits ou grands barrages.

Assez rapidement, il est apparu que les géotextiles pouvaient s'avérer également pertinents et pratiques pour réhabiliter des barrages. Les principaux rôles assumés par les géotextiles, lors de travaux de réhabilitation des barrages en remblai, sont décrits à travers quelques exemples dans le chapitre 3.

Au stade de la conception et notamment du choix des matériaux, il importe de bien distinguer, lister et caractériser l'ensemble des fonctions du géotextile, pour s'assurer qu'il pourra effectivement garder ses qualités en cours de construction, son intégrité, ou en cours d'exploitation, sa durabilité, pour jouer le rôle qu'il lui est attribué durant la durée de vie de l'ouvrage. Que dire par exemple du choix d'un drain horizontal en géotextile ayant une capacité suffisante de drainage en l'absence de confinement et serait complètement écrasé après la construction du remblai, par manque de résistance à la compression ? La classification des fonctions possibles dans un barrage, et le choix des spécifications sont traités au chapitre 4. Une place spéciale est faite à l'analyse des spécifications pour éviter ou accepter le colmatage.

2. Fonctions principales des géotextiles dans les barrages neufs

2.1 Filtration

2.1.1 Filtre horizontal aval d'un drain granulaire

En matière de drainage des barrages en terre, l'état de l'art actuel consiste à intercepter les percolations au sein du remblai dans un drain de type vertical. Les débits de percolation dans ce drain sont évacués vers l'aval par un drain horizontal qui est souvent un tapis, parfois des bretelles et quelques fois des collecteurs. Les concepteurs essayent dans la mesure du possible de compartimenter les fuites du drain vertical et celles du drain horizontal.

La filtration d'un drain horizontal fut historiquement le premier rôle dédié au géotextile dans un barrage. Le drainage du barrage de VALCROS est ainsi constitué de tranchées drainantes, de 0,25 m² de section, espacées de 8 m et reliées à un collecteur. Le filtre, entourant les tranchées et le collecteur, est un géotextile non tissé aiguilleté de filaments continus de 300 g/m² masse spécifique (figure 2).

Après 32 ans d'exploitation, le drain fonctionne toujours correctement. Des tests sur des échantillons prélevés successivement 6 ans et 22 ans après la première mise en eau, ont montré que le géotextile conservait des caractéristiques mécani-

ques et hydrauliques largement suffisantes. Les conditions de pérennité sont analysées au chapitre 4. Dans cette application, le non-colmatage du géotextile situé au-dessus du drain tapis est primordial pour la sécurité du barrage.

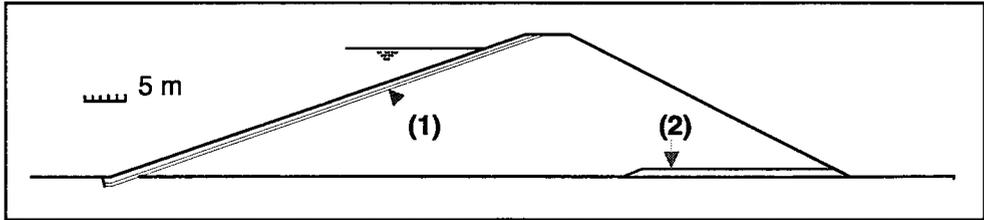


Figure 2 – coupe type du barrage de Valcros

- (1) géotextile 400 g/m² sous enrochements (épaisseur 25 cm)
- (2) géotextile 300 g/m² sur graviers 8-13 mm

2.1.2 Filtre vertical avec drain granulaire

La réalisation d'un filtre vertical géosynthétique est avantageuse si les matériaux sableux sont coûteux, mais elle est plus délicate à réaliser. En effet, les matériaux granulaires de drain et de filtre sont placés à l'avancement simultanément à ceux du noyau et des recharges des grands barrages. Dans ce cas, le recours à un géotextile n'est pas très pratique. Pour les petits barrages, le matériau drainant est placé dans une tranchée verticale mince recreusée tous les 2 à 4 mètres dans le remblai compacté. Enfin, les concepteurs sont réticents pour les grands barrages où les risques de cisaillement sismique ou de renard sont jugés importants.

La première application en grand barrage, à KILBURN (Afrique du Sud, H=55m, 1979), a consisté à poser le géotextile après excavation du matériau compacté dans une tranchée. La tranchée d'une hauteur de 1,8 m et d'une largeur de 1,1 m, contenait un filtre en sable à l'amont, un drain granulaire au centre et un filtre géosynthétique à l'aval. Tous les 1,8 mètres, le remblai était recreusé verticalement. Le géotextile était placé sur la paroi aval en le raccordant à la main avec la nappe placée dans l'élément de drain réalisé auparavant. Une plaque de séparation provisoire permettait de déverser le gravier sur une largeur de 70 cm coté aval et le sable filtrant coté amont sur une largeur de 40 cm. Notons que le concepteur n'avait par contre pas utilisé de géotextile sur la face amont, car il craignait qu'un trou non repéré n'entraîne une érosion interne. (Giroud, 1992).

Cette technique a été récemment reprise au barrage de SAMIRA (Niger, 2001, H=18 m, 4 hm³), où le drain vertical de la risberme aval a été entouré sur toute sa hauteur de 6 m, par un géotextile sur ses deux faces (figure 3). Ce barrage minier, conçu par MDM consultant, est un barrage homogène en matériaux latéritiques très fins. Dans ce cas, un risque de poinçonnement du géotextile n'était pas à

craindre. La mise en place des filtres et du drain est faite en cinq étapes (Artières et al, 2002) :

- une tranchée est creusée dans le remblai compacté, sur une profondeur de 2 m jusqu'à atteindre le collecteur d'évacuation ou la partie supérieure du drain déjà en place ;
- chaque paroi de la tranchée est revêtue d'une nappe de géotextile dont le bord excédentaire est posé à plat sur le remblai ;
- la tranchée est remplie avec le matériau drainant ;
- les bords excédentaires de géotextile sont rabattus sur le drain afin d'éviter sa pollution par le sol compacté au-dessus ;
- le remblai est compacté sur 2 m de hauteur.

Dans cette application, le non-colmatage du géotextile situé en amont du drain vertical est primordial pour la sécurité du barrage.

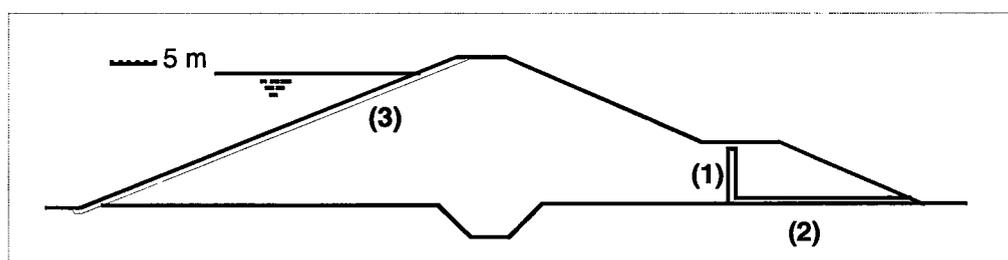


Figure 3 – coupe type du barrage de SAMIRA

(1) géotextile sur les deux faces du drain vertical, $O_t=0,10$ mm

(2) géotextile sur les deux faces du tapis drainant, $O_t=0,10$ mm

(3) géotextile renforcé sous le rip-rap, $O_t=0,08$ mm (voir § 2.1.4)

2.1.3 Filtre incliné avec drain granulaire

Compte tenu de la difficulté de pose d'un géotextile plaqué à la paroi d'une tranchée verticale, une alternative intéressante consiste à poser le complexe filtre et drain, incliné entre deux zones du remblai, après édification de la première zone. Dans ce cas, la pose de chaque nappe de géotextile en une seule fois s'avère extrêmement rapide et économique. Cette pose en permettant un contrôle soigné des géotextiles et en outre un compactage du drain lors de l'édification du remblai amont améliore la qualité du drain par rapport à la solution verticale.

La première application fut réalisée au barrage de CHATEAUVIEUX (1983, H=13m), conçu par la DDAF du Var et le CEMAGREF (figure 4). Le phasage du chantier fut le suivant :

- pose de collecteurs non perforés dans la première couche du remblai aval ;
- montée de la recharge aval ;

- mise en place du géotextile sur la face amont ;
- mise en place du matériau drainant ;
- mise en place du géotextile sur le drain ;
- compactage du remblai amont.

Cette conception est applicable à des remblais homogènes ou des remblais zonés. La stabilité du remblai avec et sans géotextile, à court et long terme doit être vérifiée avec soin à la conception (voir à ce sujet l'exemple présenté au § 3.2.1). L'inclinaison du drain peut être amont ou aval selon les caractéristiques du matériau et les situations d'exploitation. Une pente de talus assez faible est la contrepartie de la simplicité de réalisation du drain. En ce qui concerne le chantier, le contrôle de la non-déchirure du géotextile ainsi que celui du recouvrement des lés doivent être réalisés en continu durant toute la montée du remblai amont. Dans ce cas, le colmatage du géotextile amont n'est pas souhaitable mais ne constituerait pas un danger pour la sécurité du barrage. La seule conséquence serait la saturation de la partie amont du barrage jusqu'au niveau du plan d'eau. Il faut l'envisager dans le calcul de stabilité amont, mais le contournement d'un drain vertical ou incliné n'est pas possible dès lors qu'il est poursuivi au moins jusqu'au niveau des plus hautes eaux.

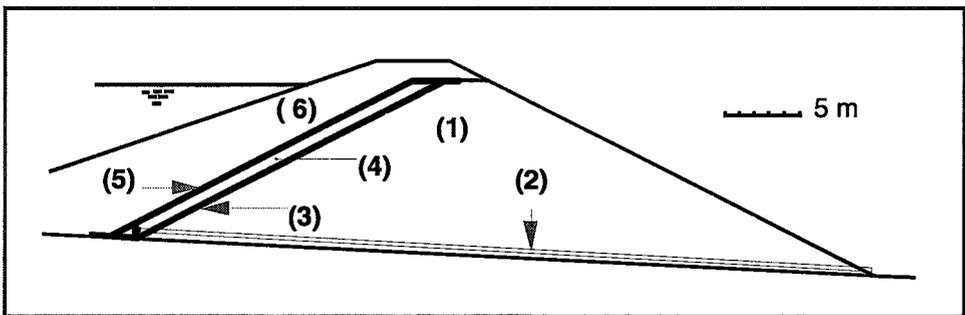


Figure 4 – drain incliné entouré par un géotextile : barrage de Châteaueux

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| (1) remblai aval | (4) drain en graviers grossiers |
| (2) collecteur des débits drainés | (5) géotextile amont |
| (3) géotextile aval (limon sableux) | (6) remblai amont et crête (argile) |

2.1.4 Filtre de transition entre rip-rap et remblai

Placé sous une protection antibatillage de barrages en terre, un géotextile évite la migration des fines par soutirage sous l'action des vagues. La première réalisation est encore celle de VALCROS (1970). Les prélèvements effectués en 1992 ont montré que le géotextile non tissé aiguilleté d'une masse surfacique de 400 g/m² placé sous 25 cm d'enrochements a conservé des caractéristiques largement suffisantes (voir § 4).

La conception doit vérifier l'absence de glissement, de déchirure à la mise en œuvre et de destruction par le rayonnement UV. A VALCROS, la protection vis-à-vis

du poinçonnement des enrochements et du rayonnement des UV est assurée par une couche de matériaux granulaires roulés. Une autre solution consiste à interposer un second géotextile antipoinçonnant. Dans cette logique, est apparu un produit renforcé formé d'un géotextile mince filtrant et d'un géotextile épais à hautes caractéristiques mécaniques (Giroud et al, 1998), commercialisé sous le nom de bidim F et baptisé « système de filtration géotextile bicouche ». Appliqué pour la première fois en 1997, ce produit est plus simple à mettre en place que deux nappes de géotextile, l'une filtrante l'autre antipoinçonnante, et de ce fait, elle est aussi plus fiable en pratique (Artières et al, 2002).

Une des toutes premières applications en protection de rip-rap a été celle du barrage de DZOUMOGNE, Mayotte (2000, H=25 m). Ce barrage homogène, conçu par Stucky Ingénieurs Conseils SA, a un déversoir revêtu d'enrochements 200-400 kg liés au mastic bitumineux dans la partie centrale. La protection du parement amont, épaisse de 60 cm, comporte une couche d'enrochements 150-500 kg avec une couche de transition en pierres 0-100 kg sur un géotextile bicouche (voir figure 4).

Le géotextile posé des deux cotés des lanières drainantes horizontales est un non tissé classique (non renforcé) car les efforts de tension ou de perforation à subir pendant la pose puis pendant la vie de l'ouvrage sont modérés. Le système de drainage horizontal évacue les eaux du drain incliné à 1/1 (Artières et al, 2002).

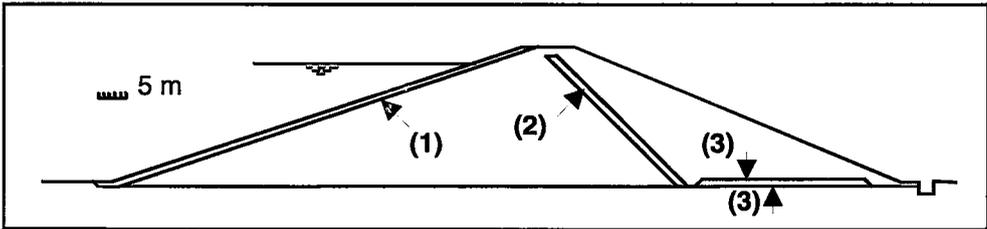


Figure 5 – barrage de Dzoumogné dans la partie non déversante

- (1) géotextile renforcé sous les enrochements amont, $O_f=0,08$ mm
- (2) drain en sable 0-4 mm
- (3) géotextile sur les deux faces des lanières drainantes, $O_f=0,10$ mm

2.2 Drainage

2.2.1 Drain d'un barrage en remblai

Plutôt que d'utiliser un dispositif drainant composé d'un matériau granulaire et de deux nappes de géotextiles, une autre solution consiste à utiliser un géotextile qui peut évacuer le débit de drainage dans son épaisseur. La première réalisation de ce type a été pratiquée en 1973 à BRUGNENS (département du Gers, H=10 m) par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne. Le géotextile est un non-tissé aiguilleté homogène de 550 g/m^2 monté en zigzag et rabattu alternative-

ment vers l'amont ou l'aval au fur et à mesure du compactage des deux moitiés du remblai.

Un progrès est ensuite apparu avec des produits géocomposites (structure synthétique drainante en sandwich entre deux géotextiles filtrants). Plusieurs petits barrages destinés à l'irrigation ont été réalisés avec ce type de drain géosynthétique dans le sud ouest de la France depuis 1984, le géotextile étant monté en zigzag de la façon suivante (voir le barrage de LA PARADE sur la figure 6) :

- le remblai est édifié en compactant alternativement des couches à l'amont puis à l'aval du drain ;
- après compactage de la couche (1), un premier panneau de géocomposite est raccordé au collecteur de pied, la largeur libre étant rabattue vers l'amont ;
- la couche (2) est compactée, et le géocomposite libre est rabattu vers l'aval ;
- la couche (3) est compactée et ainsi de suite.

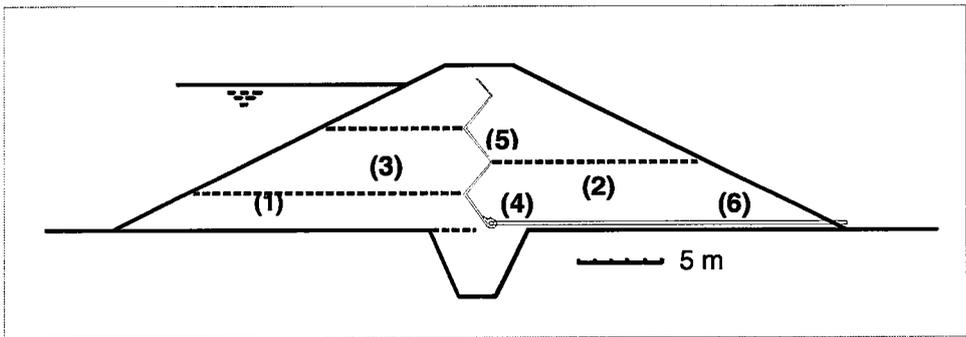


Figure 6 – Drainage vertical par géotextile composite monté en zigzag

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| (1) première couche compactée | (4) collecteur de pied enveloppé |
| (2) deuxième couche compactée | (5) géocomposite drainant |
| (3) troisième couche compactée | (6) collecteur longitudinal |

Les panneaux délivrés ont une largeur de 4 m. Il faut donc, au fur et à mesure de la montée du remblai raccorder un nouveau panneau en thermosoudant les deux géotextiles filtrants. Cette opération doit être contrôlée minutieusement car il suffirait d'un seul orifice entre deux panneaux drainants pour risquer une amorce de renard. En outre, des piézomètres ou des cellules de pression doivent être installés, y compris à l'aval du drain pour contrôler les performances de ce système et son comportement à long terme. Ce type d'application n'est pas pratiqué dans les très grands barrages, à notre connaissance.

2.2.2 Drain et filtre sous une géomembrane

Dans le cas des barrages en terre, il est recommandé de poser la géomembrane sur un matériau filtrant et drainant, raccordé à sa base à des collecteurs débouchant au pied aval. Un géotextile peut jouer ce rôle. De plus, il joue aussi le rôle de renfort contre le poinçonnement évoqué au § 2.5.

En ce qui concerne les barrages en BCR, un géotextile ayant la double fonction de protéger la géomembrane des rugosités du parement et d'évacuer les débits de fuite sous la membrane. Souvent, un produit composite associant le géotextile à la géomembrane est préféré par les concepteurs. Citons une référence française, le barrage en BCR du RIOU (EDF, Alpes de Haute Provence). Cependant l'assemblage, limité en largeur de fabrication, multiplie les soudures et en conséquence les risques de malfaçon. Ainsi, d'autres concepteurs préfèrent utiliser une géomembrane plus large et associer de manière séparée le géotextile de protection adéquat, avec si nécessaire un géotextile reprenant les efforts de glissement.

2.3 Protection anti érosion externe

Dans le cas des très petits barrages, lorsque la capacité de l'évacuateur de crue est insuffisante, la protection la plus économique peut consister à revêtir la crête et le talus aval par un géotextile protégé du rayonnement UV. Cette technique a été utilisée aux USA en 1991 aux barrages de BASS LAKE (1900, H=12 m), TROUT LAKE (1951, H=8,5 m) et PRICE LAKE (1958, H=9 m). Le géotextile est déroulé sur la crête et le parement aval et recouvert de pavés articulés en béton reliés par des câbles (Giroud, 1992). Une réalisation analogue plus récente, toujours aux USA est celle du lac de LAKE IN THE SKY (1991, H=10 m). Le revêtement est assuré par un géosynthétique formé de fils plastiques entrecroisés, recouvert de terre végétale et enherbée. Cette technique n'est efficace que pour des déversements de faible durée et à faible vitesse. Elle n'est donc applicable qu'à de très petits bassins versants. Une technique analogue consiste à utiliser un géotextile alvéolaire en nids d'abeille. Elle a été pratiquée sur des berges de canaux, rivières ou bassins. Cette technique permet de végétaliser des pentes sur lesquelles la terre végétale seule glisserait.

2.4 Géotextile utilisé en renforcement

Un géotextile pour renforcer un barrage déversant a été utilisé pour la première fois au petit barrage du vallon de MARAVAL (1974, H=8 m) conçu par la DDAF du Var et le CEMAGREF (Cassard et al, 1996). Il s'agit d'un barrage à parement aval vertical constitué d'un empilement de matelas de sol contenu dans une enveloppe de géotextile tissé polyester (figure 7). Cette solution présente plusieurs intérêts :

- volume de remblai divisé par 2 ;
- très faible coût de l'évacuateur (à condition que la fondation soit un rocher de bonne qualité mécanique) ;
- protection contre les crues de chantier assurée par le géotextile (ce qui a effectivement été vérifié).

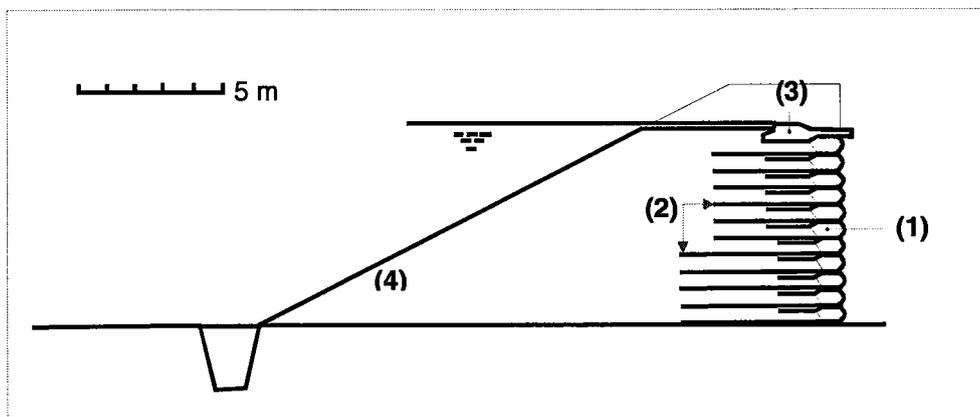


Figure 7 – barrage déversant en remblai renforcé du vallon de Maraval

- | | |
|----------------------|-----------------------------|
| (1) galets roulés | (3) seuil déversant |
| (2) géotextile tissé | (4) géomembrane bitumineuse |

Une seule application similaire a été faite par la société du canal de Provence dans les années 1980 (Alpes de Haute Provence). Le procédé a ensuite été repris et adapté dans les années 1990 en ajoutant une protection du parement aval en éléments de béton préfabriqué qui n'a pas de rôle mécanique mais un rôle de protection contre les UV et le vandalisme et un objectif d'amélioration esthétique (procédé breveté mur Ebal). Ce brevet concerne tout particulièrement l'emploi de coffrages pneumatiques glissant sur des éléments d'appui fixes. La prétension du géotextile pendant la construction limite les déformations du massif renforcé.

Plusieurs petits barrages de correction torrentielle ont été ainsi réalisés selon ce procédé dans les Pyrénées. En effet, le premier inconvénient à MARAVAL est la forte sensibilité au vandalisme. Après 26 ans, le parement a été entaillé par des tirs, heureusement sans autre conséquence que d'améliorer le drainage ! Le deuxième inconvénient est la fragilité au rayonnement ultra violet. Le géotextile a donc été enduit dès l'origine d'une résine qui explique seule la bonne tenue constatée encore à ce jour. Mais il a fallu compenser l'étanchéité ainsi involontairement apportée en perçant des petits orifices qui constitueront à long terme des points de fragilité et de départ des galets drainants.

2.5 Protection ou support antipoinçonnement de géomembranes

Les géomembranes peuvent utilement être protégées du poinçonnement par des géotextiles aussi bien en face inférieure vis à vis du remblai qu'en face supérieure vis à vis des matériaux de protection.

3. Fonctions principales des géotextiles pour réhabiliter des barrages

Souvent le confortement d'un barrage ou d'une digue en terre est réalisé par une recharge drainante posée sur un filtre, pour améliorer la stabilité et la prévention de l'érosion interne. Il est alors particulièrement aisé de placer à l'interface entre ancien et nouveau remblai un ou plusieurs géotextiles.

3.1 Filtration

Le barrage de MONTAUBRY qui alimente le canal du Centre entre Loire et Saône a été conforté en 2001 sur l'initiative de VNF, SAFEGE étant bureau d'études et la DDE de Montceau les Mines directeur de travaux. La recharge est séparée du vieux remblai et de la partie aval de la fondation par un sable propre 0-5 mm. Le drainage est amélioré par un tapis horizontal en gravier et une butée de pied en enrochement. Le tapis drainant et la butée de pied sont séparés du nouveau remblai par un géotextile bicouche protégé (voir la coupe type en figure 8). Ce géotextile joue le rôle de filtre en évitant l'entraînement du sable à travers l'enrochement. Dans ce cas, le colmatage des géotextiles n'aurait de conséquence grave pour le barrage que si le drain granulaire incliné était lui-même colmaté à sa base et ne s'opposait donc pas à la saturation de la recharge aval.

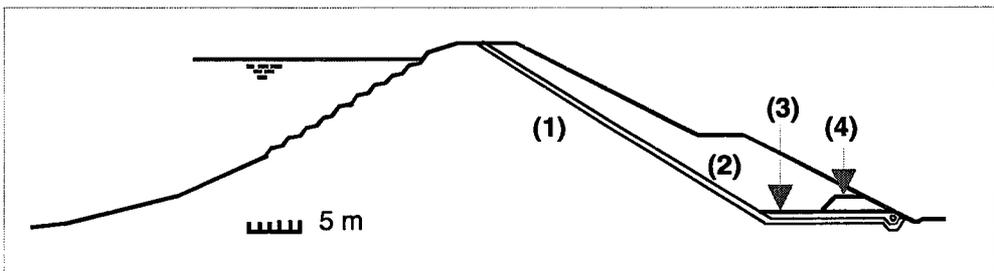


Figure 8- Barrage de Montaubry

(1) drain-filtre en sable
(2) recharge aval

(3) géotextile bicouche sur tapis drainant, $O_f=0,08$ mm
(4) géotextile bicouche sur massif de pied, $O_f=0,08$ mm

Un autre exemple est le barrage de Lavaud-Gelade, qui est un remblai homogène en gore de 22 m de hauteur, construit en 1944 dans la Creuse. Consolidé une première fois par incorporation d'une recharge aval avec drains en pierre sèche sur un tapis drainant, il fut de nouveau réhabilité en 1996, pour améliorer la sécurité vis à vis du séisme et de l'érosion interne. Le confortement a consisté à réaliser une tranchée drainante au pied du barrage, à recouvrir le parement aval d'un complexe filtre/drain et d'une recharge.

Parmi les solutions proposées pour le filtre/drain, la solution la plus économique s'avéra être l'utilisation d'un géocomposite. En effet, malgré son prix élevé, il permit de remplacer le drain granulaire entre deux non tissés et de raccourcir de 4 semaines la durée du chantier. Le géocomposite utilisé est composé de deux non tissés encadrant un noyau drainant fabriqué à chaud en structure zigzag à partir de filaments en polymères bi-composant polyamide-polyester.

Les spécifications exigeaient de satisfaire cinq fonctions de conception (tableau 1). (Elles correspondent aux normes françaises qui étaient valides en 1996. Elles ont été remplacées depuis par des normes européennes, ce qui modifie les valeurs spécifiées).

Fonction	Spécifications	Caractéristiques adoptées
Rétention	$O_f < 500$ microns	$O_f = 220$ microns
Drainage	Transmissivité $> 2.10^{-4} m^3/s/m$	Transmissivité $= 8,6.10^{-4} m^3/s/m$
	Perméabilité $> 0,5 s^{-1}$	Perméabilité $> 53 s^{-1}$
		Epaisseur 5 mm
Stabilité	Situation courante : $F > 1,5$ avec $\varphi = 2/3 \varphi_{sol}$. Situation accidentelle : $F > 1,3$ avec sous-pression provenant d'un colmatage Séisme : $F > 1,2$	Situation courante : $F > 1,8$ Situation accidentelle : $F > 1,54$ Séisme approche pseudo-statique : $F = 1,41$
Non-colmatage	$O_f > 100$ microns	$O_f = 220$ microns
Intégrité après compactage	Moins de 3 déchirures par m^2 et longueur des déchirures < 2 à 3 cm	Résistance à la traction $> 6 kN/m^2$ Allongement à la rupture : 33% Masse surfacique $650g/m^2$

Tableau 1 : caractéristiques fonctions du géocomposite de Lavaud-Gelade

L'expérience à l'époque était réduite pour satisfaire les deux dernières fonctions. La stabilité a été évaluée en considérant qu'il était possible que des fines migrent et se collent derrière le géotextile, entraînant une légère mise en pression. Mais l'économie du projet, et l'optimisation de la recharge aval justifiaient de minimiser le risque de colmatage. Pour cette raison, des géotextiles non tissés épais ou à faible ouverture de filtration ont été évités. En ce qui concerne le compactage, il fut déci-

dé de réaliser une planche d'essai sévère. Une bande de 5 m² de géotextile fut installée contre le remblai et recouverte par plusieurs couches de 30 cm de grave concassée, compactée par 10 passes de V3 à plus de 98% OPN. Malgré la présence de cailloux à arêtes vives, le non tissé aval présenta moins de 10 déchirures, de dimension maximale 5 mm. Le non tissé amont, posé sur le gore constitué d'un sable argileux avec quelques blocs, fut percé à deux endroits seulement, mais avec une déchirure maximale de 2 cm. Ce résultat a été jugé satisfaisant : en effet l'érosion interne dans le gore est lente et un réseau de collecteurs et de regards a été mis en place pour surveiller toute apparition d'érosion régressive qui se développerait par l'une des déchirures. D'autre part, les déchirures amont ne sont pas en face des déchirures aval, ainsi le choix d'un géocomposite offre plus de sécurité qu'un simple géotextile vis à vis du développement d'un renard.

Le géocomposite livré par rouleaux de 100 m de longueur et 5 m de largeur est mis en place depuis la crête. Il est fixé par cloutage en tête et dans la zone de recouvrement de 50 cm. Depuis 6 ans, le comportement du filtre est satisfaisant.

3.2 Drainage

3.2.1 Barrages en remblai

Le barrage de TEPPE ROSSE (Corse) construit en 1963-1964 est un barrage en terre homogène, haut de 13 m et drainé par un simple tapis filtrant sur le tiers aval. Des piézomètres réalisés dans le remblai en 1992 ont révélé une piézométrie anormalement élevée. Des calculs de stabilité montrent que le coefficient de sécurité au glissement est anormalement bas. Le confortement retenue consiste à épauler le barrage par une recharge aval et à le surélever en profitant de ces travaux pour doubler la capacité de la retenue. Le matériau de la recharge est identique à celui du barrage initial. L'amélioration de stabilité est obtenue par un drain continu entre barrage initial et recharge, constitué d'un géotextile composite.

La solution classique aurait consisté à placer le géotextile au contact de l'ancien parement. Le calcul de stabilité au glissement conduisait alors à un coefficient de sécurité de 0,93 certes meilleur que le coefficient du remblai actuel (0,8) mais encore insuffisant. Pour supprimer ce plan de glissement préférentiel, le talus a été retailé en marches d'escalier, ce qui porte le coefficient à 1,29. Voir figure 9. Le drain en escalier est un géotextile souple à transmissivité moyenne ($7 \cdot 10^{-5}$ m²/s sous 100 kPa). Sous la recharge, le drainage est complété par un géotextile drainant rigide de 940 g/cm² à forte transmissivité : $2 \cdot 10^{-3}$ m²/s sous 100 kPa. Enfin, le débit du tapis drainant existant est repris dans une tranchée en gravillons emballés dans un géotextile filtrant raccordé au pied aval par un collecteur de 80 mm.

L'utilisation des géotextiles drainants et filtrants a permis de réaliser ce chantier dans un délai de 3 mois, et dans de bonnes conditions (Tisserand, 1996).

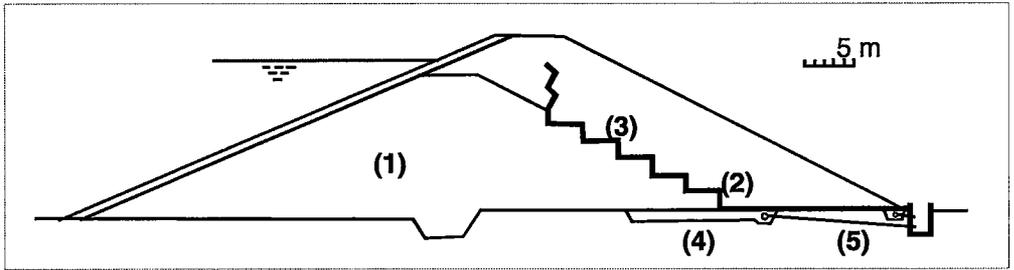


Figure 9 – Confortement (et surélévation) du barrage de Tepe Rosse

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| (1) barrage ancien | (4) drain en gravier |
| (2) géotextile drainant | (5) collecteur |
| (3) recharge aval | |

3.2.2 Barrages en maçonnerie

Dans le cas des barrages anciens en maçonnerie dont on améliore l'étanchéité par géomembrane, on utilise aussi un géotextile ayant la double fonction de protéger la géomembrane des rugosités du parement et d'évacuer les débits de fuite. En général, on préfère utiliser un produit composite où la géomembrane est associée à un géotextile. Citons une référence française, le barrage en béton de TREGAT (1972, H=17m). Une géogrille a été ajoutée entre le béton ragréé et le composite géotextile-géomembrane pour améliorer à la fois le rôle antipoinçonnant et le drainage (Tourment, 1996).

4. Fonctions des composants en géotextile

4.1 Proposition de classification des fonctions

Les fonctions de conception sont multiples. Elles dépendent de l'emplacement dans l'ouvrage et des contraintes exercées par l'environnement. Elles sont de deux types :

- des fonctions de flux (qui régissent le transport solide, le transfert d'eau et le transfert d'efforts) ;
- des fonctions de contact qui garantissent le bon fonctionnement du géotextile quelles que soient les contraintes exercées par le milieu extérieur, durant chaque phase de vie.

Les fonctions de flux caractérisent le rôle du géotextile, les principales sont :

- 1 **rétenion** : le géotextile limite complètement ou partiellement le transport des particules d'un sol ;
- 2 **drainage** : le géotextile transporte et évacue l'eau interstitielle. ;
- 3 **renforcement** : le géotextile participe à la stabilité locale ou générale du massif en réduisant les efforts appliqués sur le sol.

Les fonctions de contact sont à définir pour l'ensemble des phases de vie : la construction et l'exploitation et l'effacement. La vie du barrage étant supposée très grande, seuls deux cas sont à étudier : la mise en œuvre et l'exploitation. Au total, les fonctions de contact peuvent se regrouper en trois familles :

- 1 **intégrité** en phase construction : assurer l'absence de détérioration en cours de mise en œuvre ;
- 2 **durabilité** en phase exploitation : atteindre la durée de vie de projet ;
- 3 **respect de l'environnement** en phase d'exploitation : éviter la pollution.

En conclusion, l'application d'un géotextile dans un barrage consiste à définir pour les phases de construction et d'exploitation six types de fonctions : la rétention, le drainage, le renforcement, l'intégrité, la durabilité, le respect de l'environnement.

4.2 Les propriétés à spécifier

Les spécifications fonctionnelles sont issues de la nature de la fonction à respecter et de la nature du géotextile à employer. Les normes définissent les caractéristiques associées et garantissent la qualité de la spécification fonctionnelle. A contrario, le manque de normes peut être synonyme de solutions nouvelles ou d'absence de connaissances. Le tableau 2 établit la liste des descripteurs de spécifications fonctionnelles et de leurs normes associées, à partir des fonctions de conception principales et secondaires.

Fonction principale	Spécification	Caractéristiques	Norme
Rétention	Diamètre de rétention	Ouverture de filtration	EN ISO 12956
	Qualité de contact	Souplesse	NF G 38 021.2
	Rétention interne	Nombre de constriction	XP G 38030*
Drainage	Drainance latérale	Perméabilité normale au plan (indice de vitesse)	NF EN ISO 11058
	Drainance interne	Capacité de débit dans le plan	NF EN ISO 12956
	Drainance sous faible charge	Résistance à la pénétration de l'eau	EN 13562
Renforcement	Masse active	Masse surfacique	NF EN 965
	Résistance à la traction	Résistance à la traction et raideur	NF EN ISO 1039
	Frottement	Caractéristiques en frottement	prEN ISO 12957-1/-2
	Volume actif	Epaisseur totale	NF EN 964-1
Intégrité	Tenue sous déformation imposée	Allongement à l'effort maximum	NF EN ISO 10319
	Tenue sous fort gradient de contrainte	Résistance au poinçonnement statique	NF G 38019
	Tenue sous choc	Résistance à la perforation dynamique	NF EN 918
	Bonne adaptabilité au terrain	Energie absorbable	Calcul à partir de NF EN 10319
Durabilité	Absence de colmatage	Rapport de gradients	ASTM D5101-90
	Résistance aux attaques chimiques	Résistance au vieillissement chimique	EN 12447, ENV ISO 12960 ou ENV ISO 13438
	Tenue au vieillissement	Résistance aux agents climatiques	EN 12224
Environnement	Elimination des algues		
	Elimination des micro-organismes	Résistance à la dégradation microbologique	EN 12225

Tableau 2 - descripteurs des spécifications fonctionnelles

* A l'enquête

La signification des caractéristiques est succinctement rappelée ci-après.

Constriction : espace délimité par plusieurs fibres.

Taille de la constriction : diamètre de la plus grosse sphère qui traverse la constriction.

Ouverture de filtration : taille de la plus grosse particule qui traverse le géotextile, équivalent à la taille de la plus petite constriction rencontrée par cette particule le long du chemin qu'elle emprunte.

Indice de vitesse (perméabilité normale au plan) : vitesse d'écoulement provoquant une perte de charge de 50 mm à travers le géotextile : ainsi exprimée en m/s, elle équivaut au débit en m^3/s qui traverserait 1 m^2 sous 5 cm de perte de charge.

Capacité de débit dans le plan : produit de la perméabilité tangentielle et de l'épaisseur du système de filtration. Exprimée en $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ elle équivaut au débit drainé par le géotextile sous un gradient hydraulique de 1 et sur une largeur de 1 m.

Masse surfacique : masse moyenne du géotextile mesurée à partir de dix échantillons secs de 100 cm^2 de surface.

Épaisseur nominale : épaisseur minimale sous une contrainte de 2 kPa.

Allongement à l'effort maximum : allongement pour l'effort maximal à la traction, correspondant théoriquement à une condition de déformation latérale nulle.

Résistance à la traction : effort maximal de traction supporté par une éprouvette de 100 mm de largeur.

Souplesse : aptitude d'un géotextile à épouser la surface d'un sol irrégulier sans perdre ses propriétés.

Résistance au poinçonnement statique : résistance du géotextile soumis à un poinçon pyramidal

Résistance au poinçonnement dynamique : taille du trou laissée par la chute d'une masse conique de 1 kg tombant d'une hauteur de 1 m.

Résistance à la pénétration de l'eau : aptitude d'un géotextile à se mouiller au contact de l'eau.

Raideur : rapport entre la résistance du géotextile et sa déformation correspondante, pour une déformation donnée

Frottement : exprimé par un angle à une interface entre deux matériaux au-delà duquel il y a glissement

Rapports de gradients : rapport entre le gradient hydraulique de part et d'autre du géotextile et celui du sol amont, équivaut au rapport entre la perméabilité du sol et celui du sol au contact du géotextile.

4.3 Le risque de colmatage

Le colmatage est un risque qui a toujours préoccupé le concepteur. Heureusement, l'expérience a été pour lui rassurante. Lors des campagnes de prélèvement effectuées sur le drain aval à VALCROS au bout de 6 ans puis de 22 ans, les essais ont montré que :

- le taux de pollution est resté faible (poids de sol dans le géotextile inférieur à 4,5 % du poids de l'échantillon) ;
- les débits mesurés en 1992 à l'aval du drain sont analogues à ceux de 1976 et l'absence de fines dans l'eau percolée est notée.

L'observation au microscope d'échantillons prélevés sous le riprap du même barrage montre que :

- une petite épaisseur de sol à l'interface avec le géotextile contient moins de fines que le sol dans la masse du remblai ;
- les particules du squelette sont arrêtées par la première couche de filaments (moins d'un mm d'épaisseur) du géotextile non-tissé ;
- on n'observe pas de fines particules de sol dans le géotextile (Delmas et al, 1992).

Le colmatage n'a pas été observé au barrage de VALCROS. Au contraire, la formation naturelle d'un filtre granulaire à l'amont du géosynthétique était constatée.

En 1996, lors du colloque CFGB-CFG, l'existence du colmatage avait été constatée, mais elle était associée soit à la présence de bactéries soit à l'arrivée de boues. Cependant, aucun cas de colmatage dans un barrage n'était signalé. Depuis, deux cas montrent la trace de colmatage : la bretelle drainante de la digue C du barrage de PETIT-SAUT et le confortement du barrage de TORCY. Dans les deux cas la montée piézométrique est cependant limitée.

La cuvette du barrage de PETIT-SAUT (1995), en Guyane, est fermée par plusieurs digues de faible hauteur, qui sont fondées sur les terrains d'altération. L'absence de voile d'injection sous les digues C et D laissait craindre des résurgences dans le thalweg au pied de ces digues. Le concepteur a donc prévu de collecter les fuites dans une bretelle drainante, et de la recouvrir par une butée stabilisatrice. La bretelle drainante est constituée d'un drain granulaire 5/50 autour duquel un non tissé de 340 g/m² assure le rôle de filtre. L'expérience montra que la piézométrie dans cette zone augmentait au fil du temps et rendait douteuse

l'efficacité du drainage. La tranchée drainante fut ouverte pour vérifier son bon fonctionnement. L'excavation mit en évidence que la face aval était tapissée de particules argileuses rougeâtres humides. D'autre part le tuyau crépiné avec filtre en géosynthétique à l'extrémité amont de la bretelle était lui aussi colmaté. Les fines proviennent des fuites et du ruissellement qui les arrachent aux argiles d'altération et les transportent jusqu'au géotextile, à travers des enrochements de protection et du matériau drainant en 5/50 mm. Après enlèvement des deux géotextiles, la bretelle a été agrandie, son débit est passé de 20 l/mn à 220 l/mn, en revanche la piézométrie dans la fondation de la digue C a insuffisamment baissé.

Le barrage de TORCY-VIEUX (1800, H=12,7 m), après déboisage du parement aval, a été conforté en 1988 par une recharge stabilisatrice de 4 m de hauteur posée sur un drain en gravier entouré sur ses deux faces par un non tissé de 550g/m² et de 50 microns d'ouverture de filtration (figure 10). La piézométrie élevée et constante dans le remblai incite à découvrir le géotextile posé 10 ans auparavant. Le géotextile ne semble pas colmaté, mais la face du barrage à l'amont du géotextile est lisse et brillante. On observe une stratification parallèle à la pente, avec une couche d'épaisseur uniforme de quelques millimètres, de granulométrie apparemment plus fine que celle des couches sous-jacentes. La granulométrie de cette pellicule n'est pas foncièrement différente du matériau constitutif du barrage. La mesure de perméabilité du géotextile avec cette pellicule sous 70 kPa a abouti à 3.10⁻⁶ m/s. La permittivité de ce complexe a chuté à 10% de la valeur nominale du géotextile et à 5% sous 70 kPa. La teneur en matières organiques est 2,2% au lieu de 1,2% et le seul essai d'érosion interne réalisé a montré que l'argile pouvait être considérée comme dispersive. L'observation au microscope électronique à balayage montre un remplissage de la porosité du tiers amont de l'épaisseur du géotextile par des amas de matières minérales à composition argileuse et enrichie en fer (oxy-hydroxydes de fer). La pellicule a été certainement formée à partir d'une érosion interne qui s'est plus particulièrement développée au passage des trous laissés par l'enlèvement ou le pourrissement des racines après dessouchage. La pellicule n'est pas considérée comme un « cake », mais plutôt comme un « auto-filtre granulaire stable », dont les petites voûtes stables sont en limon, les particules d'argile auraient aisément traversé le géotextile jusqu'au moment où les dépôts de gels ferrugineux se sont formés sur les fibres du géotextile. Malgré cette conjonction d'éléments défavorables, le géotextile a malgré tout bien joué son rôle car sa perméabilité est encore supérieure à celle du remblai à drainer et le drain granulaire est resté propre. (Testemale et al, 1999).

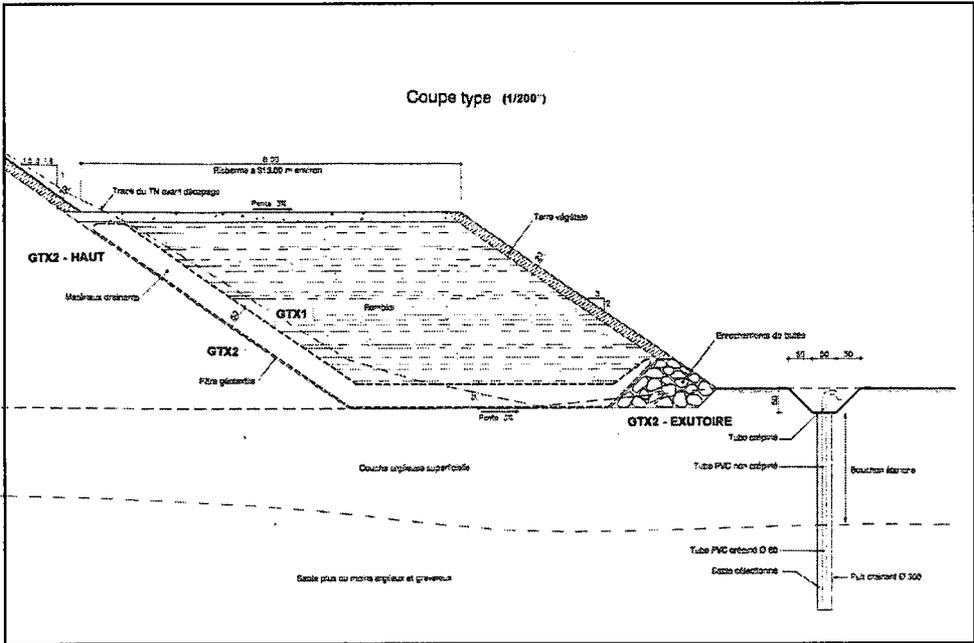


Figure 10 – confortement du barrage de Torcy-Vieux 1987-1988

Ces observations montrent que dans certaines conditions le drainage ou la baisse de piézométrie escomptée par le projeteur n'est pas atteint. Les situations qui aboutissent à un risque de colmatage méritent d'être mieux précisées et prises en compte. Dès à présent les situations d'écoulement de boue, de développement de bactéries ou de gels, de présence d'argile dispersive ou de contact avec un matériau micacé, de sols à instabilité interne (granulométrie discontinue ou granulométrie très étalée¹ sont à considérer lors de la conception comme propices au colmatage.

Le mécanisme de filtration par géotextile consiste à empêcher les plus grosses particules du sol de se déplacer, pour quelles fassent un auto filtre, tout en laissant passer les particules les plus fines. La partie de géotextile située au-delà de la première épaisseur qui a arrêté le squelette présente l'avantage de donner de la perméabilité au géotextile et l'inconvénient d'accroître la probabilité qu'une particule fine se trouve piégée dans l'épaisseur. Il faut donc éviter un géotextile trop épais. D'autre part, il faut éviter un géotextile trop fin, pour des raisons de durabilité et de résistance.

Ce type de raisonnement conduit Giroud (1996) à proposer un critère de rétention basé sur le nombre de constriction :

$$m = \sqrt{1 - n} \cdot d^*$$

où d^* est l'épaisseur adimensionnelle du géotextile ou l'épaisseur/diamètre fibre et n est la porosité, ($1-n$ représente le volume des fibres d'un échantillon divisé par le

¹ coefficient d'uniformité $d_{60}/d_{10} > 50$ ou 100 .

volume total de l'échantillon). Ce critère s'écrit (Giroud J.P., Delmas P., Artières O., 1998) :

$$\begin{cases} 40 \mu m \leq O_f \leq 80 \mu m \\ 25 \leq m \leq 40 \end{cases}$$

L'analyse de ces critères est à l'étude en vue de l'édition de nouvelles recommandations au CFG.

4.4 La fonction rétention

La pratique des filtres granulaires nous conduit à distinguer les filtres fermés, dont la rétention est totale, des filtres ouverts dont la rétention n'est assurée que si le gradient hydraulique est inférieur à une certaine valeur, ces derniers sont les filtres de transition placés sur le parement amont. Une distinction identique est à proposer pour les filtres géosynthétiques. Plus exactement trois classes de rétention peuvent être définies pour les géosynthétiques.

4.4.1 Rétention totale

Parmi tous les filtres, certains jouent un rôle fondamental pour la sécurité : ceux qui s'opposent à l'apparition d'un renard. Le filtre cheminée à l'aval du noyau d'un barrage zoné en est un exemple. Ce dernier doit être un filtre fermé et la rétention doit être totale, quel que soit le gradient hydraulique. Dans ce cas, le colmatage n'est pas un problème, dès lors qu'il est pris en compte dans le calcul de la stabilité aux glissements amont et aval.

Les règles françaises actuelles de dimensionnement consistent à comparer l'ouverture de filtration (O_f) du géotextile au diamètre d_{85} qui caractérise son squelette. Elles s'écrivent $O_f < C.d_{85}$, C étant un coefficient lié à la granularité du sol, à sa compacité et au gradient hydraulique au voisinage du géotextile. Il est compris entre 0,5 et 1,25 pour un géotextile utilisé en filtre seul. En outre, pour les sols cohérents, on ajoute la condition $O_f < 80$ microns (AFNOR, 1993). L'ouverture de filtration est très petite. Le nombre de constriction est important, la masse spécifique est élevée et la résistance à la déchirure est très élevée.

4.4.2 Rétention optimale avec absence de colmatage

Le filtre entre le drain horizontal et la fondation, ou celui utilisé en réhabilitation sous une recharge aval doit, assurer une rétention totale. En revanche, il n'est pas évident que le colmatage ait été pris en compte, lors des calculs de stabilité. Un filtre qui n'est pas sujet au colmatage est donc souhaitable. Dans ces conditions, des spécifications évitant le colmatage sont à ajouter. Le critère de Giroud, sur le nombre de constriction (m compris entre 25 et 40), semble l'approche la plus prometteuse.

4.4.3 Rétention partielle et absence de colmatage

Enfin, un filtre amont sous un riprap n'a pas obligation de rétention totale et à contrario doit éviter le colmatage. Un filtre ouvert, qui retient seulement les particules sous les gradients hydrauliques causés par la vidange de la retenue et qui évite les sous-pressions convient. L'ouverture de filtration doit être plus grande que dans les cas précédents. L'ouverture de filtration, par exemple supérieure à 180 microns, doit permettre un auto-filtre granulaire à l'amont et laisser passer à l'aval les particules argileuses et limoneuses.

Pour les applications utilisant la fonction rétention avec absence de colmatage, la souplesse du géotextile est une propriété importante qui doit être prise en compte pour le dimensionnement. Le géotextile doit pouvoir être parfaitement en contact avec la surface du matériau à protéger, sinon un déplacement de particules pourra s'amorcer et colmater le drain.

4.5 Drainage

Il existe deux types de drainage. Soit le drainage est la fonction principale du géotextile, soit elle est la fonction secondaire. Dans le premier cas, l'emploi du géotextile est crucial pour la sécurité du barrage et en règle générale le débit de fuite est évacué dans l'épaisseur de la nappe, les marges de sécurité doivent être importantes, dans le second cas, le drainage est souvent perpendiculaire à la nappe et la marge de sécurité est souvent confortable. Cependant une vérification vis-à-vis du colmatage est à entreprendre dans tous les cas.

4.5.1 Drainage dans l'épaisseur de la nappe

La perméabilité d'un géotextile dans son plan est caractérisée par sa transmissivité, exprimée en $m^3/s/m$ et mesurée selon la norme NF EN ISO 12958. Le calcul de dimensionnement doit vérifier que le débit à évacuer au point le plus bas du drain est inférieur ou égal à la capacité d'évacuation.

Le débit à évacuer est le débit linéaire d'infiltration du remblai, calculé avec la perméabilité horizontale moyenne du remblai multipliée par un coefficient de sécurité égal à 100.

La capacité d'évacuation est le produit du gradient hydraulique par la transmissivité en place. La transmissivité en place est la transmissivité nominale divisée par un coefficient de sécurité qui prend en compte la réduction de l'épaisseur avec la contrainte. Le concepteur doit donc impérativement analyser la déformation sous contrainte du géosynthétique. Les produits précomprimés en usine sont moins sensibles à l'application de charges.

4.5.2 Drainage perpendiculaire à la nappe

La perméabilité d'un géotextile perpendiculairement à son plan est caractérisée par son indice de vitesse pour une perte de charge de 50 mm, VI_{50} , exprimée en m/s et mesurée selon la norme NF EN ISO 11058.

Le changement de normes hydrauliques entre l'ancienne permittivité mesurée selon NFG38016 et le nouvel indice de vitesse mesuré selon NF EN ISO 11058 a pour effet de modifier le critère de perméabilité.

Le critère de permittivité s'écrivait : $\psi \geq A.k$, k étant la perméabilité du sol en m/s

et A un coefficient dépendant du type d'ouvrage ($A = 10^5 m^{-1}$ dans le cas d'un barrage en terre).

Le CFG travaille sur l'élaboration d'un nouveau critère utilisant l'indice de vitesse VI_{50} , qui pourrait s'exprimer de la façon suivante ; $VI_{50} \geq B.k$, avec k perméabilité du sol en m/s, et B de l'ordre de grandeur de 10^3 (-) si VI_{50} est exprimé en m/s.

4.6 Résistance mécanique

Les qualités de résistance mécanique sont particulièrement importantes dans une application en renforcement. Les propriétés importantes sont, d'après le tableau du 4.2, la résistance à la traction, l'allongement sous contrainte et la résistance au poinçonnement, mais aussi le frottement et le fluage. Dans les applications pratiquées dans les barrages, la résistance à la traction n'est pas le paramètre le plus important. La résistance au poinçonnement et l'allongement le sont davantage. Le déchirement sur les cailloux pointus est le risque principal qui doit être géré à la mise en œuvre.

4.7 Intégrité lors de la mise en œuvre

Le choix du géotextile dépend de l'énergie de chute du matériau déposé sur le géotextile et de la déformabilité du sol support, qui peut reprendre ou pas une grande partie de cette énergie. La présence d'une couche de transition ne diminue pas la sollicitation.

Dans le cas de barrages sur fondation compressible l'allongement sous l'effort maximum est le paramètre primordial, dans le cas de fondation peu compressible, la résistance au poinçonnement est le paramètre essentiel. Elle doit être particulièrement importante lorsque le sol contient des éléments grossiers. Le dimensionnement relatif à cet aspect est encore empirique. Les essais de base sont l'essai de poinçonnement statique pyramidal (norme NF G 38019) et l'essai de perforation dynamique (norme NF EN 918). Certains organismes, comme le BAW en Allemagne, ont développé des essais d'endommagement spécifique correspondant à la chute d'enrochement.

4.8 Durabilité

Lors des campagnes de prélèvement effectuées à VALCROS au bout de 6 ans puis de 22 ans, les essais de traction ont montré que la résistance a très peu évolué (baisse de l'ordre de 15 % dans le sens production, atteinte au bout de 6 ans ; pas de baisse mesurable dans le sens travers).

La nature chimique de l'eau est particulièrement importante, si les polymères résistent bien aux eaux acides d'un pH supérieur à 4, le polyéthylène et le polypropylène résistent aux eaux basiques d'un pH inférieur à 14.

Le contact avec le rayonnement solaire est à limiter au maximum. La durée de vie décroît avec la durée d'exposition. Auparavant des résines pouvaient réduire cet impact mais en rigidifiant le géotextile, maintenant des traitements anti-UV en usine sont possibles : additifs mélangés dans la masse des polymères, enduction de fils....

4.9 Respect de l'environnement

De manière générale, les géosynthétiques travaillent pour le développement durable : ils sont stables chimiquement, ils limitent la production de carrières, ils protègent le sol.

5. Conclusion

Les géotextiles sont utilisés avec succès dans une grande gamme d'ouvrages. Dans le cas des barrages, les fonctions les plus sollicitées sont la rétention (en présence de circulation d'eau) et le drainage. Ces fonctions sont le plus généralement vitales pour la sécurité des barrages. Aussi, si les barrages sont loin de constituer le champ principal d'application des géotextiles, ils sont sans doute l'un des terrains les plus difficiles et les plus susceptibles d'inciter fabricants et concepteurs à innover et progresser encore.

Les conclusions principales peuvent se résumer ainsi en distinguant les fonctions principales. Nous supposons que tous les barrages sont drainés par un drain vertical ou incliné poursuivi au moins au niveau des plus hautes eaux.

5.1 Géotextile sous rip rap

Fonction : rétention des particules du remblai amont, sous l'effet du battillage ou lors des vidanges (rétention partielle au sens du § 4.4.3).

Propriétés à favoriser : principalement un bon allongement et la résistance à la déchirure et au poinçonnement pour éviter le déchirement lors de la pose par des

matériaux angulaires ; une bonne perméabilité et un bon coefficient de frottement (dans le cas de pentes fortes).

En cas de défaillance par présence d'un trou² : risque d'érosion du parement amont, mais pas de risque d'érosion interne.

En cas de défaillance par colmatage : risque de sous pression et d'instabilité lors de la vidange, sans risque de rupture du barrage.

Remplacement : assez facile.

5.2 Géotextile amont d'un drain granulaire vertical

Fonction : filtration du sol soumis à un écoulement permanent et protection de la capacité de drainage du drain granulaire (rétention totale au sens du § 4.4.1).

En cas de défaillance par présence d'un trou : risque d'érosion interne pouvant entraîner un colmatage du drain granulaire et un renard amenant la rupture du barrage.

En cas de défaillance par colmatage : risque de mise en pression totale du remblai amont, sans grave danger pour le barrage, sous réserve que la tenue au glissement du parement amont soit vérifiée dans cette situation.

Propriétés à favoriser : principalement la résistance à la déchirure lors de la pose et au poinçonnement par des matériaux angulaires situés dans la recharge amont ou dans le drain.

Remplacement : très difficile.

5.3 Géotextile amont³ d'un drain horizontal

Fonction : protection du drain granulaire (pollution par le sol en contact et surtout filtration du sol soumis à un écoulement permanent venant de la fondation). La rétention est optimale, au sens du § 4.4.2.

En cas de défaillance par présence d'un trou : risque d'érosion interne pouvant déboucher sur un colmatage du drain granulaire puis sur un renard affectant tout le barrage. La rupture du barrage est possible.

En cas de défaillance par colmatage : risque élevé de contournement du drain et d'apparition de sous pressions au pied aval du barrage pouvant soit favoriser un risque de glissement soit entraîner un renard en fondation.

Propriétés à favoriser : le non-colmatage ; la résistance à la déchirure lors de la pose et au poinçonnement par des matériaux angulaires situés dans la recharge amont ou dans le drain.

Remplacement : très difficile à difficile selon la position du drain.

² déchirure ou non-recouvrement

³ amont dans l'écoulement de la fondation vers le drain. C'est donc le géotextile situé sous le drain horizontal.

5.4 Géotextile aval⁴ d'un drain vertical

Fonction : protection du drain granulaire (de la pollution par une recharge aval en sol fin et de l'entraînement au travers d'une recharge en sols grossiers).

En cas de défaillance par présence d'un trou : risque de pollution localisée du matériau granulaire du drain.

En cas de défaillance par colmatage : sans objet.

Propriétés à favoriser : la résistance à la déchirure lors de la pose et au poinçonnement par des matériaux angulaires situés dans la recharge amont ou dans le drain ; le non-colmatage.

Remplacement : très difficile à difficile.

5.5 Géotextile aval d'un drain horizontal

Fonction : protection du drain granulaire (pollution par la recharge, entraînement à travers la recharge).

En cas de défaillance par présence d'un trou : risque de pollution localisée du matériau granulaire du drain et éventuellement risque d'érosion interne.

En cas de défaillance par colmatage : apparition de sous pressions au pied aval du barrage pouvant soit favoriser un risque de glissement soit entraîner un renard en fondation.

Propriétés à favoriser : la résistance à la déchirure lors de la pose et au poinçonnement par des matériaux angulaires situés dans la recharge amont ou dans le drain.

Remplacement : très difficile. Possibilité de compenser en ajoutant des puits de décompression à réaliser après abaissement de la retenue.

5.6 Recommandations

Comparé à un matériau granulaire, le géotextile apporte un grand nombre d'avantages et en particulier une rapidité d'exécution et une garantie plus grande de régularité des performances et de respect des prescriptions. On peut d'ailleurs noter que la très grande majorité des géotextiles vendus sur le marché français sont certifiés par une tierce partie, l'ASQUAL, ce qui atteste la véracité et la constance des caractéristiques. En contrepartie, la technicité du chantier est plus grande.

Une attention toute spéciale doit être portée à la surveillance de la mise en œuvre pour éviter des défauts de recouvrement, des déchirures, des mises en tension, un mauvais contact avec le matériau à filtrer, la pollution par de la boue... L'attention doit être attirée à ce sujet sur le cas des petits barrages pour lesquels le contrôle de mise en œuvre est rarement permanent.

⁴ aval dans l'écoulement de la fondation vers le drain. C'est donc le géotextile situé sur le drain horizontal.

La localisation des géotextiles doit être pensée en imaginant des solutions de remplacement ou de compensation.

La technique du drain vertical (ou incliné) poursuivi au moins jusqu'au niveau des plus hautes eaux pour assurer la stabilité en cas de crue doit être favorisée.

Dans certains cas, il est choisi de placer un tuyau perforé au sein du matériau granulaire, pour améliorer sa capacité d'évacuation ou pour favoriser la collecte et la mesure des débits de fuite. Ce tuyau ne doit impérativement pas être entouré par un géotextile, d'une part car cela est inutile, d'autre part car cela peut entraîner le colmatage du géotextile par délavage des fines d'un drain en gravier imparfaitement propre. Par contre le géotextile doit entourer le massif granulaire.

Enfin, les recommandations concernant le colmatage doivent être affinées.

Remerciements

Les auteurs remercient MM Olivier Artières (Bidim Geosynthetics SA), Jean-Pierre Becue (SAFEGE Ingénieurs Conseils), Alain Jensen (Stucky Ingénieurs Conseils SA) et Albert Koffler (Huesker Synthetic) pour les informations qu'ils ont aimablement fournies.

Bibliographie

AFNOR, 1993. Détermination des caractéristiques hydrauliques et mise en œuvre des géotextiles et produits apparentés utilisés dans les systèmes de drainage et de filtration. Norme NF G 38-061.

AFNOR, 2001. Géotextiles et produits apparentés. Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction de réservoirs et de barrages. Norme NF EN 13254

Artières O., Tcherniavski J.G., 2002. Geotextile filtration systems for dams – 30 years of improvement, *seventh international conference on geosynthetics*, Nice, 6 p (à paraître).

CEN, 2001. Géosynthétiques – Termes et définitions. Projet de norme prEN ISO 10318 :2001 de juillet 2001.

CFGB, 1982. Question Rapport Congrès CIGB, Madrid.

CFGB, CFG, 1996. Les géotextiles et les géomembranes dans les barrages, recueil de communications, *colloque technique*, Paris, 11 juin 1996.

CFGG, 1986. Recommandations générales pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration, 22p.

Cassard A., Kern F., 1996. Barrage à talus aval vertical en sol renforcé par géotextile : le barrage du Maraval, *Colloque technique CFGB-CFG "les géotextiles et les géomembranes dans les barrages"*, Paris, p. 4.1-4.6.

Delmas Ph., Faure Y.H., Farkouh B., Nancey A., 1992. Comportement à long terme d'un géotextile non-tissé dans un barrage de plus de 20 ans, *Colloque "Rencontre 93"*, Tours, p. 303-309.

Giroud J.P., 1992. Geosynthetics in dams : two decades of experience, *Geotechnical Fabrics Report*, IFAI, St-Paul, Minnesota, USA, July 1992, p 6-9, september 1992, p 22-28.

Giroud J.P., 1996. Granular Filters and Geotextile Filters. In J. Lafleur & A.L. Rollin (eds), *Proc. of Geofilter96, Montréal, May 1996*. p. 565-680. Richmond: Bitech Publishers.

Giroud J.P., Delmas P., Artières O., 1998. Theoretical basis for the development of a two layers geotextile filter, *6th international conference on geosynthetics*, Atlanta, p. 1037-1044.

Testemale J.-P., Faure Y., Parron C., Lambert S., Royet P., Fagon Y., 1999. Filtre géotextile du barrage de Torcy-Vieux (Saône et Loire) : prélèvements et analyses. *Ingénieries-EAT numéro spécial Géosynthétiques-Matériaux et applications*, p.31-39.

Tisserand C., 1996. Rehaussement du barrage de Teppe Rosse, *Colloque technique CFGB-CFG "les géotextiles et les géomembranes dans les barrages"*, Paris, p. 5.1-5.8.

Tourment R., 1996. Réhabilitation du barrage de Trégat, *Colloque technique CFGB-CFG "les géotextiles et les géomembranes dans les barrages"*, Paris, p. 12.1-12.7.

Le groupe de travail européen sur les géomembranes mises en œuvre sur les barrages

Working group for geomembranes as facing materials

Marc LEFRANC
EDF-CIH
Savoie Technolac
73373 Le Bourget-du-Lac Cedex

Hugues GIRARD
CEMAGREF
50 avenue de Verdun
33610 CESTAS

Résumé : Cette communication fait la synthèse des activités du Groupe de travail du club européen de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) sur l'emploi des géomembranes sur les barrages créé en 1993. Elle analyse rapidement les données recueillies et présente les objectifs et le contenu du futur bulletin CIGB sur les géomembranes mises en œuvres sur les barrages.

Abstract : *This paper summarises the activity of the working group for geomembranes and synthetics as facing materials created in 1993. It analyses quickly the data received and outlines the objectives and the contents of the forthcoming bulletin of CIGB about geomembranes on dams*

Mots-clés : géomembrane, géosynthétique, barrage, étanchéité.

Keywords : *geomembrane, geosynthetic, dam, sealing system.*

1. Préambule

Les Dispositifs d'Etanchéité par Géomembrane (DEG) sont maintenant reconnus comme des techniques sûres et fiables sur la durée, tant pour assurer l'étanchéité principale de nouveaux barrages que pour la restaurer à l'occasion de la réhabilitation des ouvrages. Les principaux avantages reconnus sont : la rapidité de mise en œuvre, la souplesse d'utilisation (réparations ponctuelles, pontages de joints ou de fissures ou mise en œuvre sur la totalité des parements amont) et des coûts compétitifs face à d'autres solutions techniques plus traditionnelles.

On peut estimer à plus de 150 le nombre d'ouvrages étanchés par une géomembrane, dont 80 en Europe.

Jusqu'à ce jour, les fabricants de géosynthétiques, ainsi que les organisations professionnelles ont essentiellement porté leurs efforts sur la normalisation des caractéristiques physiques, chimiques des produits fabriqués ainsi que sur les tests associés, action complétée par la démarche de certification des produits et des poseurs. Parallèlement à cette action, dès les années 80, le développement rapide de

cette technique sur de « grands » barrages a conduit les Maîtres d'ouvrages, Maîtres d'œuvre et Entreprises à s'intéresser et formaliser les aspects liés à la conception et à la mise en œuvre de ces dispositifs d'étanchéité par géomembranes sur des barrages. Cette démarche a conduit à l'édition en 1981 du premier bulletin sur ce sujet (bulletin N° 39 de la CIGB), puis d'un second en 1991 (N° 78). Depuis cette date, l'usage des géomembranes dans le monde et en Europe en particulier s'est fortement accru.

En 1993, lors du premier Colloque Européen des Grands Barrages, à Chambéry, organisé par le Comité Français des Grands Barrages, il a été décidé de créer un groupe de travail européen sur l'emploi des géomembranes sur les barrages pour renforcer la connaissance, par l'analyse du retour d'expérience sur les dispositifs d'étanchéité avec géomembranes mis en œuvre sur ces ouvrages, en vue d'accroître la fiabilité et la qualité des installations à venir et éviter des expériences négatives qui discréditeraient une technologie performante, face aux méthodes plus anciennes.

Cette communication fait la synthèse à ce jour des activités du Groupe de travail du Club Européen de la CIGB sur l'emploi des géomembranes sur les barrages depuis sa création.

2. La composition du groupe de travail

La composition du groupe a évolué au cours de ses années de vie. Il est actuellement constitué des représentants suivants :

Allemagne	Lutz Dieter SCHEWE	Lahmeyer International
Autriche	Heinz BRUNOLD	STEWEG
Espagne	Escolatico AGUIAR GONZALEZ	BALTEN
	Manuel BLANCO FERNANDEZ	Laboratorio Central de Estructuras y materials
France	Hugues GIRARD	Cemagref
	Marc LEFRANC	EDF
Italie	Alberto SCUERO	CARPI
	Gabriella VASCHETTI	CARPI
	Piero SEMBENELLI	Sembenelli Consulting
	Caterina MASSARO	Azienda Energetica Metropolitana Torino S.p.A
	Daniele CAZZUFFI	ENEL
Portugal	José Luis MACHADO DO VALE	Tecnasol FGE
Suisse	Paul BARTEK	RHONERWERKE AG
République Tcheque	Petr BREZINA	POVODI ODRY
USA	Robert KOERNER	GRI-Geosynthetics Research Institute
Royaume Uni	Geoff SIMS	

3. La méthode proposée et son évolution

Pour accroître la connaissance sur un sujet, il est nécessaire de recueillir des données sur les expériences passées, en vue de les analyser, vérifier les principales conclusions (problèmes liés à la mise en œuvre, à la conception ou au vieillissement), identifier les bons comportements, rechercher des similarités puis discuter les principes à retenir dans la conclusion.

Le groupe a donc décidé en première étape de recenser les caractéristiques d'un maximum de mises en œuvres de système d'étanchéité par géomembranes sur les barrages. Pour cela un questionnaire unique a été établi et diffusé de la façon la plus large possible aux Maîtres d'ouvrages, soit au travers des membres des Comités Nationaux des Grands Barrages, soit directement aux intéressés quand ceux-ci étaient connus.

Ce questionnaire joint en annexe 2 comporte trois volets :

1. Information sur le barrage : localisation, type, âge, dimensions, etc. , pour identifier les conditions d'exploitation du système d'étanchéité,
2. Description du système d'étanchéité : caractéristique de la géomembrane, drainage, mode de fixation, protection, surface concernée, etc. ,
3. Appréciation du système d'étanchéité : problèmes à la mise en œuvre, réparations, effets sur les fuites et les sous pressions, coûts, satisfactions globales intrinsèques et par rapport aux systèmes traditionnels d'étanchéité, etc.

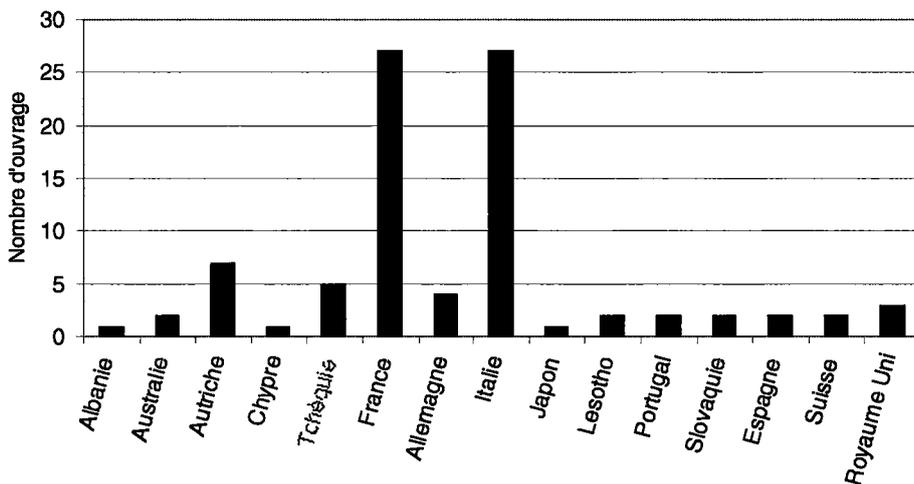
L'analyse de la base de données ainsi constituée (voir extrait en annexe 1) ainsi que l'évolution des techniques qui rendait obsolète le bulletin N° 78, a conduit le Groupe de travail à proposer au Comité International des Grand Barrages (qui a accepté) de faire une mise à jour du Bulletin N°78 par rédaction d'un nouveau bulletin, actuellement en cours d'élaboration. Ce nouveau bulletin se veut être un outil pratique à l'usage du projeteur, pour la conception et la mise en œuvre de dispositif d'étanchéité par géomembrane sur les barrages à la fois sur les nouveaux ouvrages mais aussi dans le cadre de la réhabilitation des ouvrages.

4. Les résultats

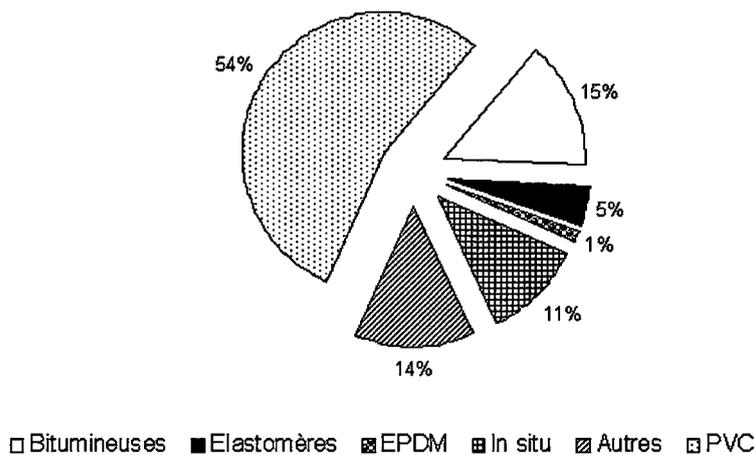
4.1 Base de données

La base de données comporte à ce jour 88 enregistrements avec quelques enregistrements complémentaires sur des barrages situés hors Europe : Australie (2), Lesotho (2).

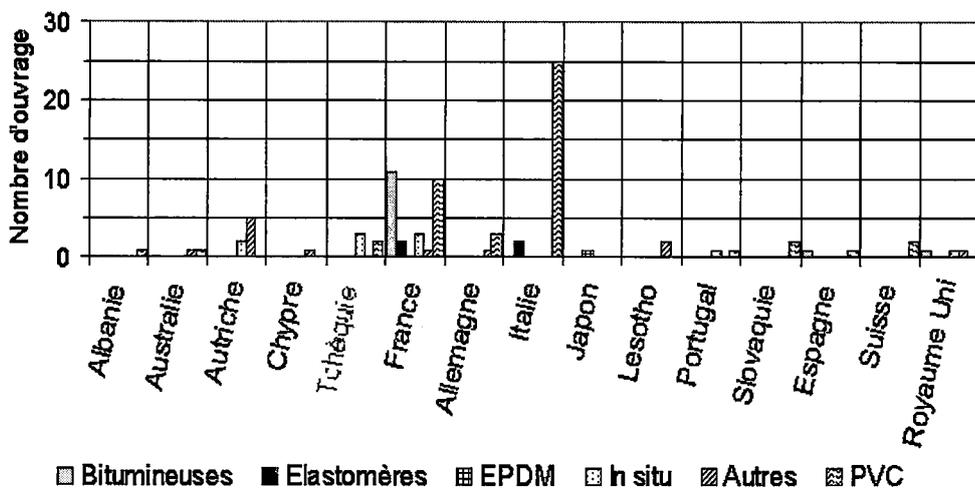
L'analyse de ces données montre que :



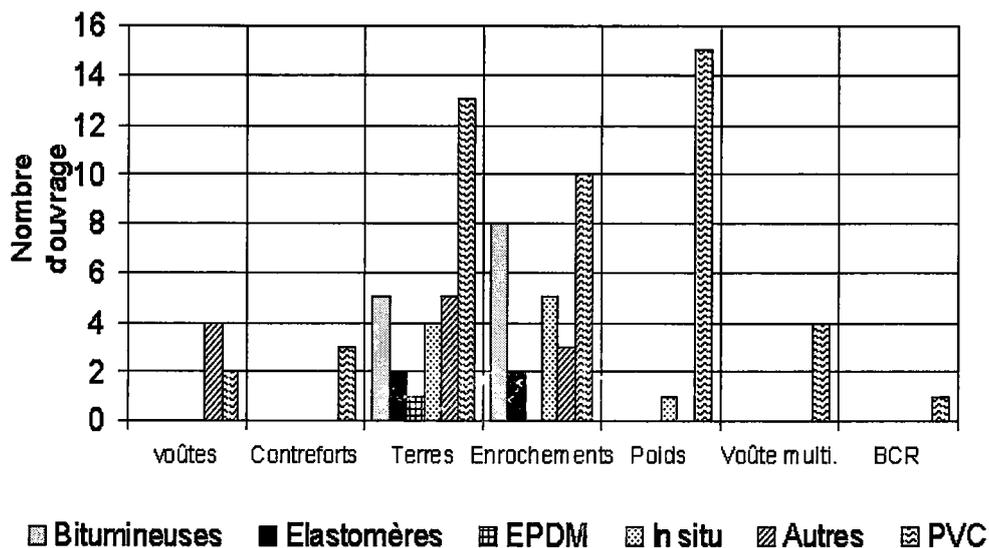
L'Italie et la France sont les pays qui comptent le plus d'ouvrages utilisant des dispositifs d'étanchéité par géomembranes.



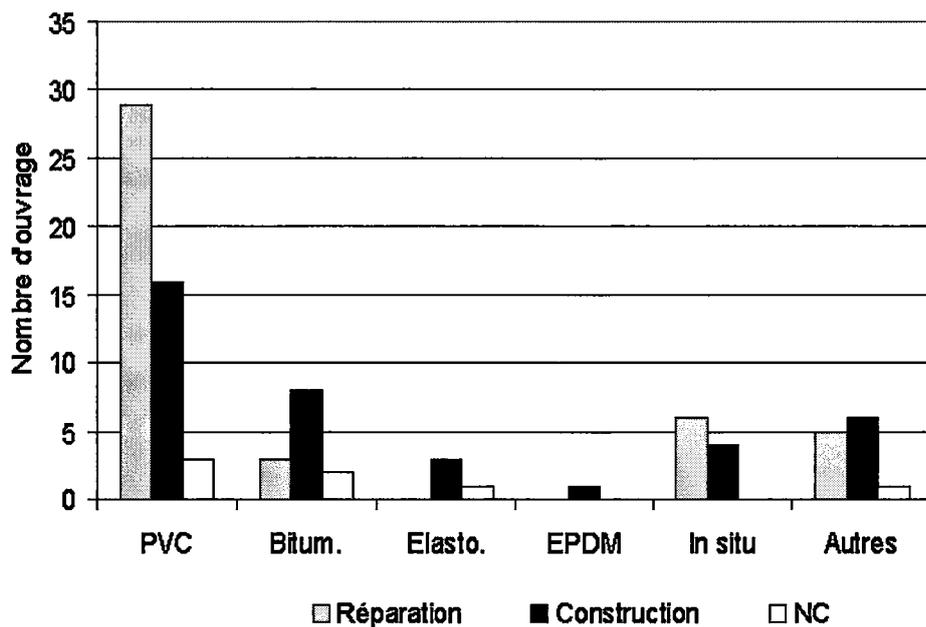
L'analyse par type de géomembranes montre que les géomembranes PVC sont de loin les plus représentées (54%), devant les géomembranes bitumineuses (15%).



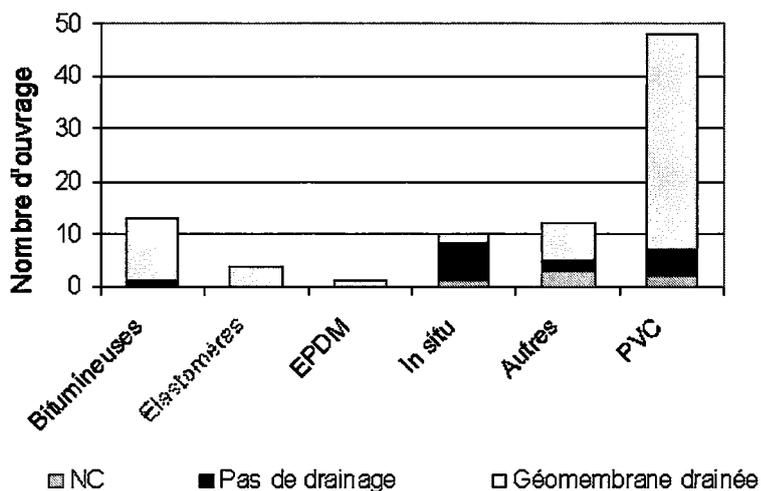
En Italie on met en œuvre majoritairement des géomembranes PVC, alors que les types de géomembranes mises en œuvre en France sont équilibrés entre PVC et bitumineuses .



L'analyse par type de barrages montre que les géomembranes bitumineuses ne sont naturellement utilisées que sur des ouvrages en remblais, les géomembranes PVC sont plus diversifiées dans leur utilisation.



On constate également que les géomembranes PVC et celles réalisées in-situ sont préférentiellement utilisées en réhabilitation d'ouvrages, alors que les géomembranes bitumineuses concernent principalement des ouvrages neufs.



A l'exception des géomembranes réalisées in-situ, les géomembranes sont très majoritairement drainées.

4.2 Nouveau Bulletin

La structure du nouveau bulletin en cours de réalisation comportera :

- ◄ une introduction aux géosynthétiques et leur classement en différentes familles ;
- ◄ la classification et les caractéristiques des géomembranes ; ce chapitre traitera également des spécifications des matériaux et des tests normalisés ;
- ◄ les contraintes auxquelles les géomembranes sont exposées avec les critères de conception ;
- ◄ des recommandations pour la conception et la mise en œuvre des dispositifs d'étanchéité par géomembranes selon les différents types de barrages (remblais, bétons, BCR) ; tant pour des barrages neufs que pour des opérations de réhabilitation les modes de mise en œuvre traiteront des cas où la géomembrane est protégée ou sans protection ; l'installation sous l'eau sera évoquée ;
- ◄ les principes de l'Assurance Qualité dans le domaine des géomembranes ;
- ◄ une identification des critères d'acceptabilité ;
- ◄ une proposition de cahier des charges pour la conception, l'approvisionnement, la mise en œuvre.

Le projet de sommaire plus détaillé, maintenant proche de la version définitive, est joint en annexe 3.

5. Bibliographie

- Stockholm 5, 7 juin 1996 « Groupe de Travail Européen pour les géomembranes et les géosynthétiques comme revêtements » p 561 - A. Scuro, G. Vaschetti.
- Barcelone 17 – 19 juin 1998 « Working group for geomembranes and geosynthetics as facing material : Final report » Volume2 page 1577 - A. Scuro, G. Vaschetti,
- Geiranger 25 – 27 juin 2001 « Geomembrane sealing systems for dams : a new bulletin » Volume annexe (late paper) p 61 - A. Scuro.

Annexe 1 : Extrait de la base de données

Barrage						Géomembrane				
Nom	Pays	type	Année de mise en eau	Hauteur en m	Altitude crête	Type de géomembrane	Année d'installation	Présence drainage	Situation géomembrane	Surface installée
Bovilla	Albania	earthfill	1996	91	321	PVC	1996	Yes	covered	9000
Cowarra Creek	Australia	rockfill	1800	20		Autre	1985		exposed	
Cracow	Australia	rockfill	1997	40	335	PVC	1987		exposed	
Kölnbreinsperre	Austria	arch	1977	200	1902	Autre	1981-1985	Yes	exposed/covered	9000
Schiegels	Austria	arch	1971	131	1782	Autre	1981-1983	No	covered	850
Zillertalgründl	Austria	arch	1988	186	1852	Autre	1986	Yes	covered	3000
Burtscha	Austria	earthfill	1997	20	1324,5	Autre	1996-1997	Yes	covered	2160
Rodund II,										
Pumpstelcherbecken	Austria	earthfill	1975	6	645,5	Autre	1984	No	covered	3300
Großer Mühdorfer See	Austria	gravity	1957	46	2320	In situ Geom.	1979-1982	No	exposed	4000
Oschenik	Austria	rockfill	1979	116	2394	In situ Geom.	1985	No	exposed	500
Symvoulos	Cyprus	rockfill	1992			Autre	1992	Yes	covered	10000
Kyjiche - Ujezd	Czech Republic	earthfill	1983	17	206,1	In situ Geom.	1980	Yes	covered	35000
Trnavka	Czech Republic	earthfill	1983	20	417	In situ Geom.	1981	Yes	covered	6360
Humenice	Czech Republic	rockfill	1989	20	545	In situ Geom.	1988	No	covered	4500
Landstejn	Czech Republic	rockfill	1974	27	575,9	PVC	1973/74	Yes	covered	11000
Obecnice	Czech Republic	rockfill	1966	16	566,45	PVC	1971	No	covered	7500
Arctzans	France	earthfill	1931	16	637	In situ Geom.	1987	No	exposed	6000
Aubrec	France	earthfill	1986	15	1305	PVC	1986	Yes	covered	6600
Banegon	France	earthfill	1973	17		Bituminous	1973/1983	Yes	exposed	0
Bois de Cure	France	earthfill	1932	6,9	263,9	Bituminous	1983	Yes	exposed	10756
Les Merquisades	France	earthfill	1974	22	408,5	Bituminous	1950	Yes	exposed	350
Miel	France	earthfill	1988	15	509	Elastomeric	1987	Yes	covered	2740
Moulin du Long	France	earthfill	1987	5	1076	PVC	1988	Yes	exposed	450
Rouffiac (or Lenouaille)	France	earthfill	1993	12,5		Bituminous	1983	Yes	covered	4700
Selvet	France	earthfill	1996	18	1050	Autre	1996	Yes	covered	7500
Valence d'Albi	France	earthfill	1988	15	444	Bituminous	1988	No	covered	2000
Chartrain	France	gravity	1892	54	491	PVC	1993	Yes	exposed	6000
Le Chambon	France	gravity	1935	136	1042,5	PVC	1991 to 1996	Yes	exposed	9100

Barrage						Géomembrane				
Nom	Pays	type	Année de mise en eau	Hauteur en m	Altitude crête	Type de géomembrane	Année d'installation	Présence drainage	Situation géomembrane	Surface installée
La Grotte	France	multiple arch	1950	48	1754	PVC	1994	Yes	exposed	760
Migouérou	France	multiple arch	1959	29	2280,3	PVC	1989	Yes	exposed	480
Le Ricu	France	RCC	1991	20,6	640	PVC	1990	Yes	exposed	4200
Araing	France	rockfill	1942	26	1911	In situ Geom.	1987	No	exposed	410
Borfloch	France	rockfill	1993	18	28	Bituminous	1993	Yes	covered	4000
Codole	France	rockfill	1983	28	116	PVC	1983	Yes	covered	16000
Empurary	France	rockfill	1995	19,4	570,7	PVC	1995	Yes	covered	2200
Figari	France	rockfill	1990	35	52	PVC	1990	Yes	covered	5800
La Lande-Chitelet	France	rockfill	1983	17	1053,75	Bituminous	1983	Yes	covered	1750
Mes d'Armand	France	rockfill	1981	22	947	Bituminous	1981	Yes	exposed	9800
Mauriac	France	rockfill	1989	14,5	639,5	Bituminous	1989	Yes	exposed	6000
Neris	France	rockfill	1972	18		Elastomeric	1972	Yes	covered	3200
Ortolo	France	rockfill	1996	36	172	Bituminous	1996	Yes	covered	6600
Ospedale	France	rockfill	1978	26	951	Bituminous	1978	Yes	covered	5000
Rouchain	France	rockfill	1976	60	500	In situ Geom.	1983		exposed	16000
Blitburg	Germany	earthfill	1972	13	250	PVC	1972	Yes	covered	0
Blitburg	Germany	earthfill	1972	13	250	Autre	1978	Yes	covered	0
Heimbach	Germany	gravity	1935	12		PVC	1974	No	exposed	500
Wenholthausen	Germany	rockfill	1971	17		PVC	1971	Yes	covered	2000
Publino	Italy	arch	1952	40	2135	PVC	1988-89	Yes	exposed	5450
Zolezzi	Italy	arch	1923	22	352	PVC	1992	Yes	exposed	430
Pantano d'Avio	Italy	buttress	1956	65	2378	PVC	1992	Yes	exposed	17000
Scals	Italy	buttress	1939	65	1495	PVC	1992 to 1995	Yes	exposed	15129
Cixerri Secondary No. 2	Italy	earthfill	1989	9	42	PVC	1989	Yes	covered	3440
Cixerri Secondary No. 3	Italy	earthfill	1989	11	42	PVC	1989	Yes	covered	6770
Lempeggiano	Italy	earthfill	1993	34	247	PVC	1990		covered	2000
Locone	Italy	earthfill	1986	66,62	194,6	Elastomeric	1982	Yes	exposed	30000
Mucone	Italy	earthfill	1967	7	175	PVC	1987	Yes	covered	12000

Nom	Barrage					Géomembrane				
	Pays	type	Année de mise en eau	Hauteur en m	Altitude crête	Type de géomembrane	Année d'installation	Présence drainage	Situation géomembrane	Surface installée
Peppadal	Italy	earthfill	1993	27	112	PVC	1991-1992	Yes	covered	0
Peppadal Secondary 3-4	Italy	earthfill	1992	8,5	112	PVC	1991	Yes	covered	10500
Pian del Gorghiglio	Italy	earthfill	1944	10	650,5	PVC	1979	Yes	exposed	28000
Alpe Oera	Italy	gravity	1984	174	2128	PVC	1993-1994	Yes	exposed	10000
Camposecco	Italy	gravity	1930	27	2336,5	PVC	1993	Yes	exposed	4800
Ceresolo	Italy	gravity	1930	57	1574	PVC	1992	Yes	exposed	6800
Cignana	Italy	gravity	1928	58	2173	PVC	1999	Yes	exposed	8250
Lago Ballone	Italy	gravity	1930	37	2283,05	PVC	1994	Yes	exposed	2100
Lago Miller	Italy	gravity	1928	11	2170	PVC	1976	No	exposed	1500
Lago Nero	Italy	gravity	1926	43	2027,15	PVC	1981	Yes	exposed	4000
Lerechio	Italy	gravity	1938	33	1837,5	PVC	1993-94	Yes	exposed	2500
Mura	Italy	gravity	1917	9	614,27	PVC	1992	Yes	exposed	1100
Piano Barbellino	Italy	gravity	1931	68	1872	PVC	1987	Yes	exposed	6000
Molato	Italy	multiple arch	1928	55	352	PVC	1987	Yes	exposed	700
Pian Sapeto	Italy	multiple arch	1926	16	865	PVC	1989-90	Yes	exposed	2400
Contrada Sabetta	Italy	rockfill	1959	32,5	315	Elastomeric	1959	Yes	covered	1900
Pioda	Italy	rockfill	1950	14,5	728	PVC	1985	Yes	exposed	0
Sa Forada	Italy	rockfill	1962	30	190,4	PVC	1992	Yes	exposed	9160
Upper Pond of Okinawa-Yambaru Pumped Storage HPP	Japan	earthfill	1998	25	154	EPDM	1994-1996	Yes	exposed	53800
Katse	Lesotho	arch	1997	185	2053	Autre			covered	17325
Mafeteng	Lesotho	rockfill				Autre			covered	
Pracana	Portugal	buttress	1951	65	115	PVC	1992	Yes	exposed	6000
Paradela	Portugal	rockfill	1959	110	743,5	In situ Geom.	1980	No	covered	73000
Dobšina	Slovakia	earthfill	1960	10	438	PVC	1960	No	covered	650
Tvrdošín	Slovakia	earthfill	1977	16	578,6	PVC	1976	No	covered	10000
Marín Gonzalo	Spain	rockfill	1987	55	286	Bituminous	1990	Yes	exposed	
Odiel	Spain	rockfill	1970	41	268	PVC	1970-1982	Yes	covered	1600
Fully	Switzerland	gravity	1913	13	2139	PVC	1996	Yes	exposed	830
Ilse	Switzerland	gravity	1927	25	2361	PVC	1998-97	Yes	exposed	3620
Eislack	United Kingdom	earthfill	1932	22	205,7	In situ Geom.	1932	No	exposed	50000
Elvington balancing and settling reservoirs (tot 3)	United Kingdom	earthfill	1995	5	15	Autre	1994-1995	Yes	exposed	95000
Winscar	United Kingdom	rockfill	1975	52	345	Bituminous	1974	Yes	exposed	25000

Annexe 2 : Questionnaire

EUROPEAN WORKING GROUP FOR GEOMEMBRANES AND GEOSYNTHETICS AS FACING MATERIALS

SYNTHETIC WATERPROOFING LININGS: INSTALLATION AND PERFORMANCE

All returned Forms will be welcome, even if not completed due to lack of some informations. Were this the case, we ask you to please complete at least SECTION A - MAIN INFORMATIONS. We thank you for any other additional material (drawings, exploitation diagrams, papers, articles etc.) you can provide.

TECHNICAL FORM

A.0 The present form is completed by

A.0.1 Agency:.....
A.0.2 Name:..... A.0.3 Position:.....
A.0.4 Date of completion:..... A.0.5 Date of previous form if any:.....

SECTION A - MAIN INFORMATIONS

DAM

A.1 IDENTIFICATION OF DAM

A.1.1 Country:
A.1.2 Name of dam:
A.1.3 Name of river:
A.1.4 Owner:
A.1.5 Type a. gravity
 b. buttress
 c. arch
 d. multiple arch
 e. embankment - earthfill
 f. embankment - rockfill
 g. tailings
 h. RCC
 i. cofferdam
A.1.6 Year of completion of construction of the dam:.....

A.2 DAM CHARACTERISTICS

A.2.1 Height:
A.2.2 Altitude at crest:
A.2.3 Length at crest:
A.2.4 Spillways:
A.2.5 Intakes:
A.2.6 Gallery:
A.2.7 Upstream facing
 a. concrete
 b. bituminous concrete

A.3 SERVICE CONDITIONS

A.3.1 Reservoir capacity:m³
A.3.2 Altitude of minimum water level in the reservoir:.....
A.3.3 Yearly percentage of minimum water level in the reservoir:.....
Environmental agents
A.3.4 Max. ice thickness:.....
A.3.5 Max. wind speed:.....

- e. RCC
- f. metal plates
- g. resins
- a. max. in the hottest day:....
- b. min. in coldest day:.....

A.2.8 Upstream face inclination: 1V : ... H

A.2.9 Upstream face orientation:.....

A.2.10 Upstream face surface:..... m²

If available, please enclose diagrams of average water level variations during the year.

SECTION A - MAIN INFORMATIONS

WATERPROOFING LINING

If some informations are not available, do not complete and proceed to further questions. All Forms, even if not completed, will be welcome.

A.4 WATERPROOFING GEOMEMBRANE

- A.4.1 Geomembrane type
- a. PVC
 - b. HYPALON
 - c. EPDM
 - d. HDPE
 - e. PP
 - f. Bituminous
 - g. Other:.....

A.4.2 Geomembrane reinforcement

A.4.2.1 present No Yes

- A.4.2.2 type
- a. backed: mass per unit area of backing.....g/m²
 - b. scrim: mass per unit area.....g/m²

A.4.3 Geomembrane physical characteristics

A.4.3.1 thickness:mm

A.4.3.2 mass per unit area:g/m².

A.4.3.3 sheets width:m

A.4.3.4 color:.....

A.5 INSTALLATION

A.5.1 Installation data

A.5.1.1 Company:

A.5.1.2 Year/years of installation :

A.5.1.3 Total surface of geomembrane installed:..... m²

A.5.2 Support preparation

- a. sand blasting
- b. high pressure water cleaning
- c. local surface rehabilitation
- d. surface rehabilitation
- e. transition layer if applicable, type
 - 1. geotextile
 - 2. geonet
 - 3. other
- f. other

A.5.3 Drainage behind geomembrane

A.5.3.1 present No Yes

- A.5.3.2 type
- a. geotextile
 - b. geonet
 - c. other

A.5.4 Anchorage to upstream face

- The geomembrane is a. glued
 b. mechanically anchored
 c. ballasted

A.5.5 Protection of geomembrane

- The geomembrane is a. exposed b. covered

Notes:.....

A.6 GENERAL COMMENTS

A.6.1 Have there been problems during installation? Yes No

A.6.1.1 If Yes, please specify.....

A.6.2 Has the perimeter watertight anchorage been efficient? Yes No

A.6.3.1 Rate of leakage before installation:.....

A.6.3.2 Rate of leakage after installation:.....

A.6.4. Has there been any mechanical damage during subsequent service (due to action of rocks, ice, transported material, etc.)? Yes No

A.6.4.1 If Yes, illustrate the cause of damage.....

A.6.4.2 If Yes, have repairs been necessary, and of which type?.....

A.6.4.3 How many years after installation of the liner have repairs been accomplished?.....

A.6.5 Did the geomembrane show significant ageing? Yes No

A.6.5.1 If Yes, of which type?.....

A.6.5.2 If Yes, after how many years?.....

A.6.6 Do you deem the waterproofing system an efficient solution from the technical point of view? Yes No

A.6.7 Do you deem the waterproofing system efficient solution from the point of view of costs? Yes No

SECTION B - ADDITIONAL INFORMATIONS

WATERPROOFING LINING

B.1 WATERPROOFING GEOMEMBRANE

B.1.1 The geomembrane has been installed

- a. at the time of first construction of the dam
- b. as a waterproofing element in a subsequent repair

B.1.2 Geomembrane characteristics

To allow extensive and balanced data collection, please enclose table of the manufacturer or contract specifications, if available.

B.1.3 Geomembrane reinforcement - type of polymer of reinforcement, if available:.....

B.1.4 Commercial features of the geomembrane

B.1.4.1 Trade name:.....

B.1.4.2 Manufacturer:.....

B.2 INSTALLATION

B.2.1 Geomembrane

B.2.1.1 Overlapping of sheets:cm

B.2.1.2 Sheets junctions type

- a. thermofusion
 - 1. hot gas
 - 2. hot wedge
 - 3. other
 - b. extrusion welding
 - c. adhesive
 - d. chemical
 - e. other
- 1. simple track
 - 2. double track

B.2.2 Drainage behind geomembrane

B.2.2.1 present No Yes

B.2.2.2 type of drainage layer a. geotextileg/m²
 b. geonetg/m²
 c. other

B.2.2.3 divisions - is drainage divided in sections? Yes No

B.2.2.4 type of drainage water discharge a. in gallery
 b. downstream
 c. upstream

B.2.3 Anchorage to upstream face

The geomembrane is a. glued
 b. mechanically anchored
 c. ballasted

Additional Characteristics

If the geomembrane is mechanically anchored, to allow more extensive data collection please specify type and material of anchorage, and gaskets and surface preparation if any.

Anchorage at crest:

Anchorage at heel:

Longitudinal anchorage:

Anchorage at particular elements:

If available, please supply sketches.

B.2.4 Perimeter seal

- The perimeter seal is a. mechanical, with adhesive
 b. mechanical, with rubber gasket

B.2.5 Protection of geomembrane (if applicable)

- a. none
 b. concrete
 c. prefabricated elements
 d. shotcrete / gunitite
 e. riprap
 f. soil
 g. other

B.2.5.1 Has the protection been applied directly onto the geomembrane?

- Yes No

B.2.5.2 If No, specify transition layer

- a. geotextile
 b. geonet
 c. other

B.2.6 Quality control

- B.2.6.1 of geomembrane** a. by manufacturer 1. on the raw components
 2. on the geomembrane
 b. by a Third Party 1. Yes, specify third Party.....
 2. No

- B.2.6.2 of seams, during installation** Yes No

B.2.7 Additional features of system

- B.2.7.1 Drainage water monitoring** a. Yes - specify which type.....
 b. No

- B.2.7.2 Leak detection system** a. Yes - specify which type.....
 b. No

- B.2.7.3 De-icing device** a. Yes - specify which type.....
 b. No

B.2.8 Additional features of installation

B.2.8.1 Duration of works of installation of geomembrane:.....months

B.2.8.2 Cost (year) :..... Local monetary unit/m²

Annexe 3 : Projet de sommaire du Nouveau Bulletin

1. INTRODUCTION
 - 1.1. Scope
 - 1.2. Definition of geomembrane and geocomposite
 - 1.3. Overview of geosynthetics
 - 1.3.1. *GEOTEXTILES*
 - 1.3.2. *GEOGRIDS*
 - 1.3.3. *GEONETS*
 - 1.3.4. *GEOMEMBRANES*
 - 1.3.5. *GEOCOMPOSITES*
 - 1.4. CONTENT OF BULLETIN
2. MATERIALS PROPERTIES AND TESTING
 - 2.1. Overview of synthetic materials used for geomembranes
 - 2.1.1. *POLYMERIC MATERIALS*
 - 2.1.2. *REINFORCEMENT FOR GEOMEMBRANES*
 - 2.1.3. *GEOCOMPOSITES*
 - 2.2. Properties
 - 2.2.1. *PHYSICAL PROPERTIES*
 - 2.2.2. *CHEMICAL PROPERTIES*
 - 2.2.3. *MECHANICAL PROPERTIES*
 - 2.2.4. *ENVIRONMENTAL ENDURANCE PROPERTIES*
 - 2.2.5. *LIFETIME*
 - 2.3. Testing methods
3. GENERAL DESIGN CONSIDERATIONS
 - 3.1. Loading
 - 3.1.1. *PUNCTURES*
 - 3.1.2. *IMPACT*
 - 3.1.3. *WIND*
 - 3.1.4. *RESERVOIR WAVES AND ICE*
 - 3.1.5. *UPLIFT FROM WATER OR GAS*
 - 3.1.6. *DISPLACEMENTS*
 - 3.1.7. *CHEMICAL AND BIOLOGICAL ATTACK*
 - 3.1.8. *TEMPERATURE*
 - 3.1.9. *ULTRA VIOLET RADIATION*
 - 3.1.10. *WATER*
 - 3.2. Layout of lining system
 - 3.2.1. *BASE LAYER*
 - 3.2.2. *DRAINAGE SYSTEM*
 - 3.2.3. *SEALING MEMBRANE*
 - 3.2.4. *SEAMING*
 - 3.2.5. *COVERING SYSTEM*
 - 3.2.6. *ANCHORAGE*
 - 3.3. Material selection
 - 3.4. Monitoring system

4. GEOMEMBRANES ON MASONRY, CONCRETE AND RCC DAMS
 - 4.1. Range of applications
 - 4.1.1. *APPLICATIONS IN NEW DAM CONSTRUCTION*
 - 4.1.2. *APPLICATIONS IN DAM REHABILITATION*
 - 4.2. Design principles
 - 4.3. Installation techniques
 - 4.4. Typical examples
5. GEOMEMBRANES ON EMBANKMENT DAMS
 - 5.1. Range of applications
 - 5.1.1. *APPLICATIONS IN NEW DAM CONSTRUCTION*
 - 5.1.2. *APPLICATIONS IN DAM REHABILITATION*
 - 5.2. Design principles
 - 5.3. Installation techniques
 - 5.4. Typical examples
6. QUALITY ASSURANCE
 - 6.1. Manufacturing quality control
 - 6.2. Quality assurance during installation
 - 6.3. Monitoring during operation
 - 6.4. Maintenance
7. GUIDANCE ON TECHNICAL CONTENT OF CONTRACTS
 - 7.1. Technical specifications
 - 7.2. Acceptance criteria of performed works
 - 7.3. Bill of quantities and conditions
 - 7.4. General evaluation criteria
8. CONCLUSIONS
9. APPENDIXES
 - 9.1. Data base on geomembranes
 - 9.2. Terminology
 - 9.3. References
 - 9.4. Standards

La durabilité des géomembranes dans les barrages en remblai

Durability of geomembranes in embankment dams

Claude TISSERAND (O.E.H.C), Daniel POULAIN et Paul ROYET (Cemagref)

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 20 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 20 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.*

Mots-clés : barrage en remblai, géomembrane P.V.C., géomembrane bitumineuse, géomembrane butyl, fuites, vieillissement

Keywords: embankment dam, PVC geomembrane, bituminous geomembrane, butyl geomembrane, leakage, ageing

Introduction

En France, 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 CTGREF et de la DDAF 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 CFGB - CFG de 1996 et nous renvoyons le lecteur à la référence [1].

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'OSPEDALE (Corse) conçu par l'OEHC 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. Pour ne citer que les plus importants, mentionnons :

- 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
- ORTOLO (Corse) en 1997
- 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 1. On espère pouvoir réaliser la même opération au barrage de Codole à l'occasion de sa prochaine inspection décennale, car là 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 au chapitre 2 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 chapitre 3.

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

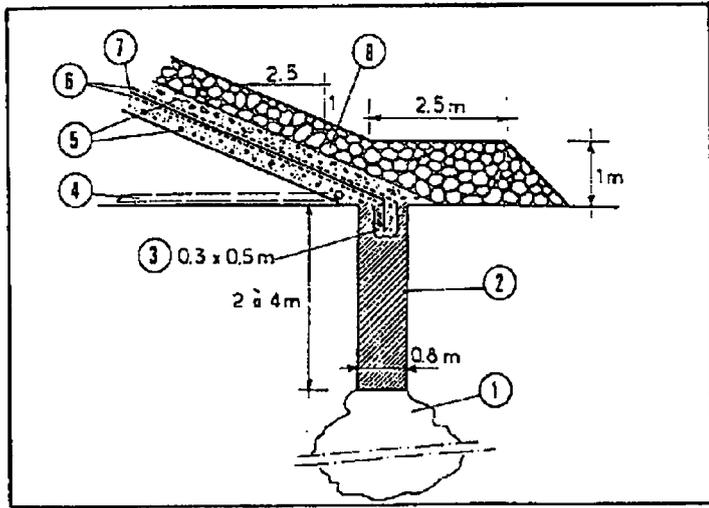
1.1 Description de l'ouvrage et de son étanchéité

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 gravelo-sableux, construit au sud du Massif Central en moyenne montagne (altitude 1300 m) sur un substratum basaltique. 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 graveleux 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 fruit 2,5 :

- 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.



- | | |
|--|--|
| 1 Injections | 5 Grave concassée 0-25 mm (0,20 m) |
| 2 Paroi moulée | 6 Géotextile non tissé (500 g/m ²) |
| 3 Tranchée d'ancrage de la géomembrane | 7 Géomembrane PVC (épaisseur = 1,2 mm) |
| 4 Drain | 8 Enrochements 100-300 mm (0,50 m) |

Fig. n°1 : Barrage d'Aubrac - coupe schématique du DEG

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 1000 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 [3].

1.2 Évolution de la géomembrane

Le comportement du barrage d'Aubrac, 15 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 3 plots témoins sur le versant rive gauche à 3 niveaux différents :

- en fond de retenue : zone immergée ;
- à mi-pente : zone de marnage ;
- en haut de pente : zone au dessus du 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.



Fig. n°2 : Prélèvement d'un échantillon

Des prélèvements (figure 2) ont été effectués lors de vidanges de la retenue en 1989, 1993 et 2000 soit respectivement 3, 7 et 14 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-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 1.

Caractéristiques	Echantillons	Stockés	Bas	Mi-talus	Haut
Plastifiant (%)		31,6	31,4	31,5	30,7
Epaisseur (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

Tableau n° 1 : Résultats des essais sur échantillons prélevés au barrage d'Aubrac en novembre 2000

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, 14 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 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-axiale (figure 3) 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.

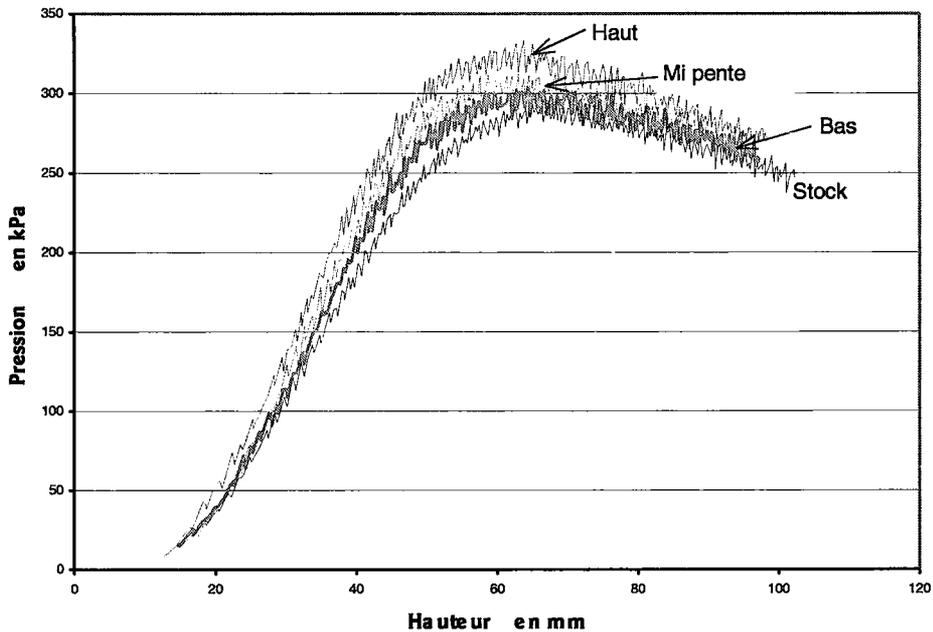


Fig. n°3 : Essais de traction multi-axiale (éclatométrie) sur les échantillons prélevés en 2000 au barrage d'Aubrac

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 4) ; 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 4 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 7 dernières années que pendant les 4 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.

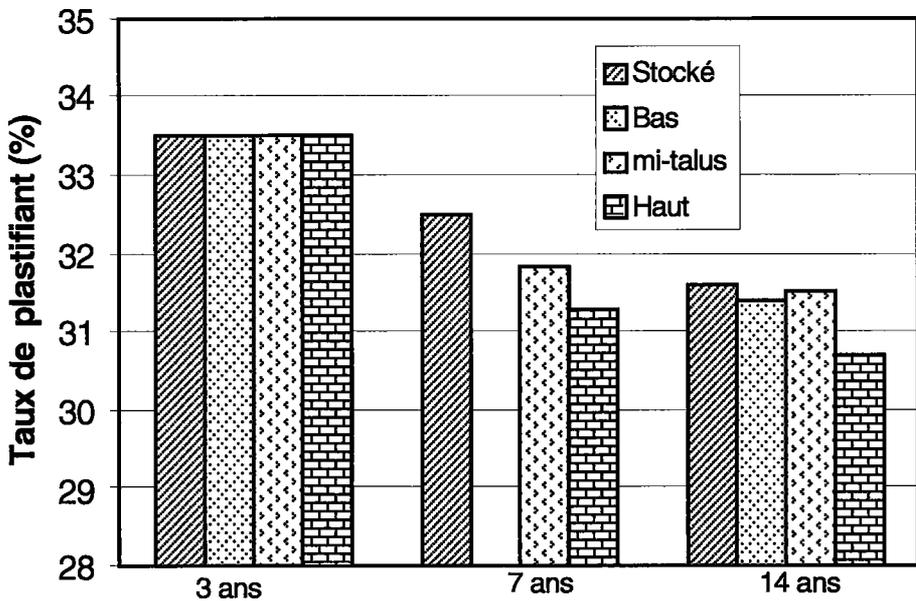


Fig. n°4 : Evolution du taux de plastifiant de la géomembrane du barrage d'Aubrac

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.

2. Suivi des fuites sur les barrages auscultés

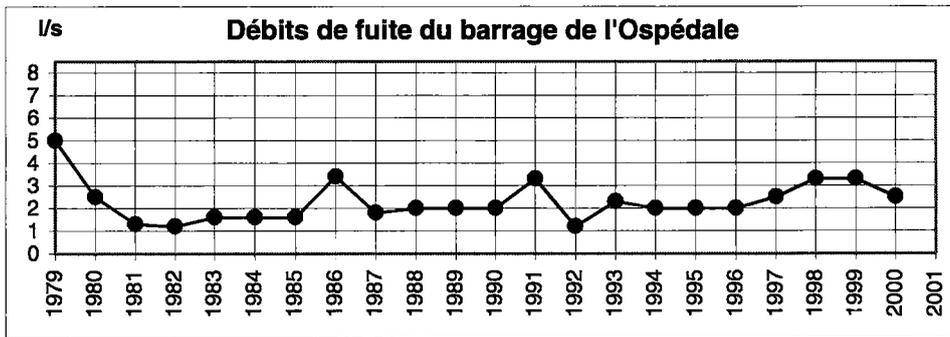
Les graphiques présentés ci-après appellent les commentaires suivants :

- 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.

2.1 OSPEDALE

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 23 années d'exploitation à ce jour. Son D.E.G., posé sur un parement de fruit 1,7, est constitué par [2] :

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



Le graphique des fuites 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 96.

On notera que ce débit, ramené au m² 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.

2.2 CODOLE

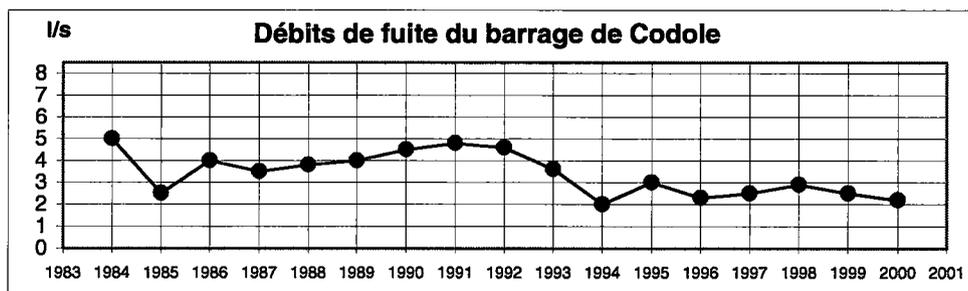
Construit de 1979 à 1983, cet ouvrage en enrochements de 28 m de hauteur a été mis en eau en 1984, ce qui lui donne 17 années d'exploitation à ce jour. Son D.E.G., posé sur un parement de fruit 1,7, diffère quelque peu de celui de l'Ospédale puisqu'il comprend [2] :

- une couche support identique ;
- une géomembrane en P.V.C. souple de 2mm, solidaire du géotextile support ;
- une couche de protection de 14 cm, en béton légèrement armé coulé en place (dalles de 5x5 m²), posée sur géotextile non tissé de 400 g/m².

Le graphique des débits de fuite 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 ;
- 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 m² 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.



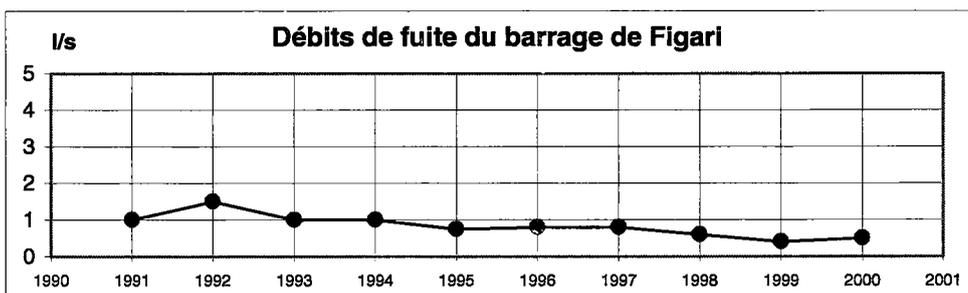
En conclusion, on peut considérer que l'état général de cette étanchéité est excellent et n'inspire aucune inquiétude.

2.3 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 11 années d'exploitation à ce jour. Son D.E.G., posé sur un parement de fruit 1,7, diffère un peu de celui de Codole en ce qu'il comprend [2] :

- une couche support inchangée, sauf que le géotextile n'est pas solidaire de la géomembrane ;
- une géomembrane en P.V.C. 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 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 m² 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.

2.4 ORTOLO

Construit de 1994 à 1996, cet ouvrage en enrochements de 37 m de hauteur a été mis en eau (officiellement !) en 1997, ce qui lui donne 6 années d'exploitation à ce jour. Son D.E.G., posé sur un parement de fruit 1,7, s'apparente à l'ensemble de ses prédécesseurs, avec toutefois quelques nuances :

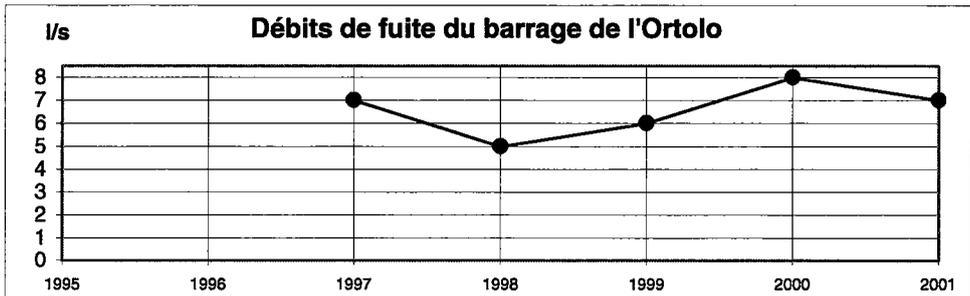
- la couche support est identique ;
- la géomembrane est identique à celle de l'Ospédale, avec des géotextiles posés en indépendance et des contrôles de soudures plus sophistiqués ;
- la couche de protection est du type "Figari" (béton armé de fibres).

Le graphique 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 uni-

quement 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 7 fois plus qu'à Figari, et 3 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.

2.5 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 10cm 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.

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 parafouille 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 10 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 :

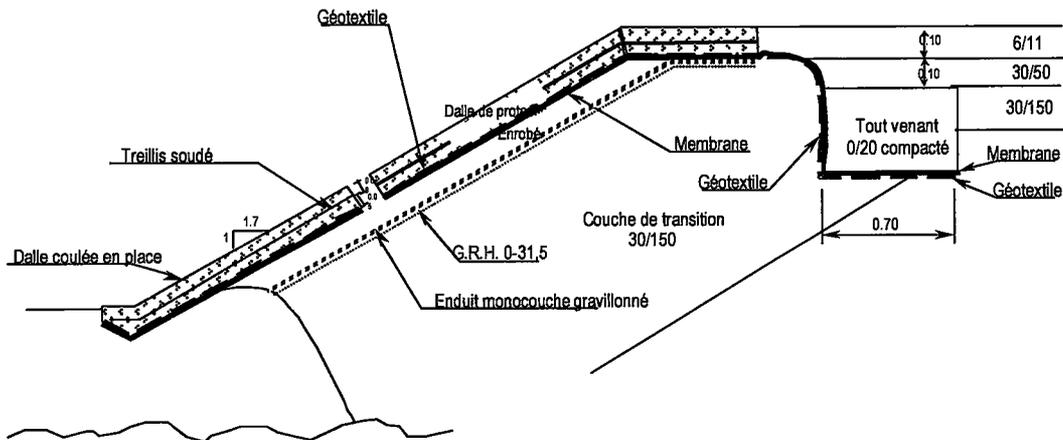
- un débit total de fuite de 3,2 l/s au premier remplissage en 1991 ;
- un débit ramené à environ 2,5 l/s en 1993-94 ;
- un débit apparemment stabilisé sur la période 1998-2001, à la valeur de 1,5 l/s.

Ramené au m² de section barrée, ce débit est de l'ordre de **0,9 l/h/m²**, 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.

2.6 Barrage de BORFLOC'H

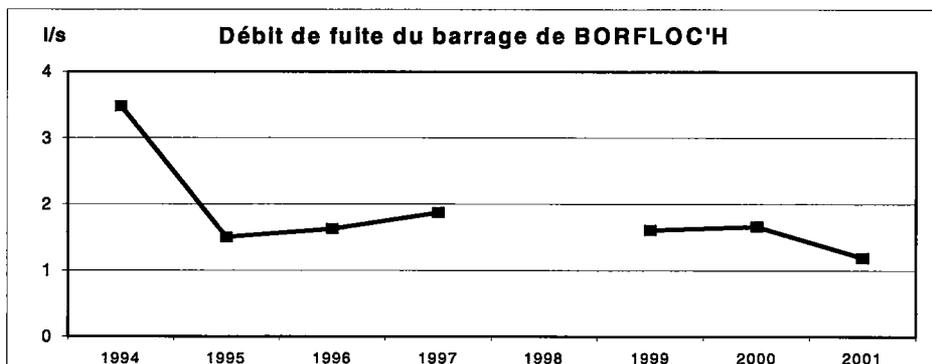
Destiné à l'alimentation en eau potable de Belle Ile en Mer, le barrage de Borfloc'h est constitué d'un remblai en enrochements compactés de 19 m de hauteur au-dessus du terrain naturel. Il est doté d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane sur le parement amont de fruit 1,7 :

- 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 m²) ;
- géotextile ;
- dalles de béton, armées de treillis soudé (8 cm d'épaisseur).



Barrage de Borfloc'h - Coupe type de l'étanchéité

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 9 années d'exploitation.



Lors la première mise en eau, des fuites relativement importantes ont été constatées, 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.

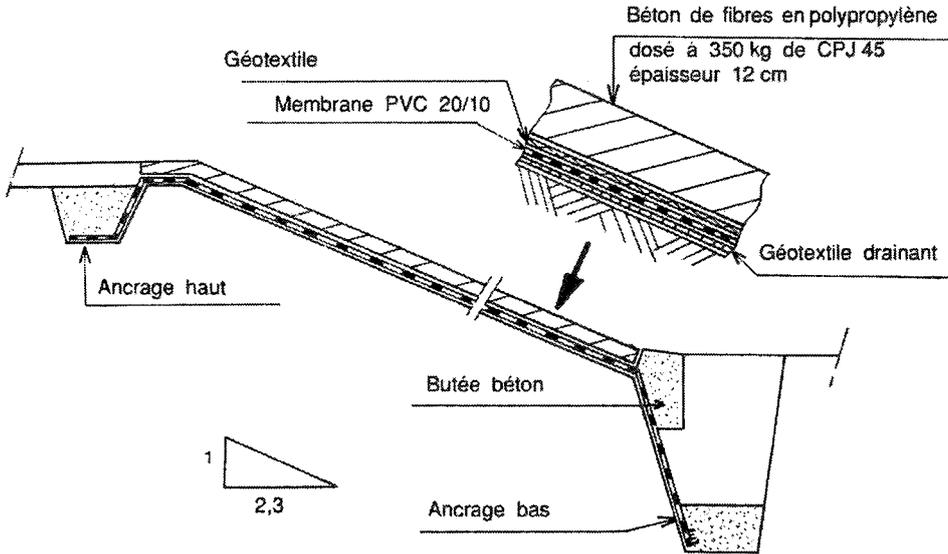
2.7 Barrage de la MADONE

Le barrage de la Madone (Rhône) est destiné à l'irrigation. Il est constitué 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 ;
- 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. A 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.

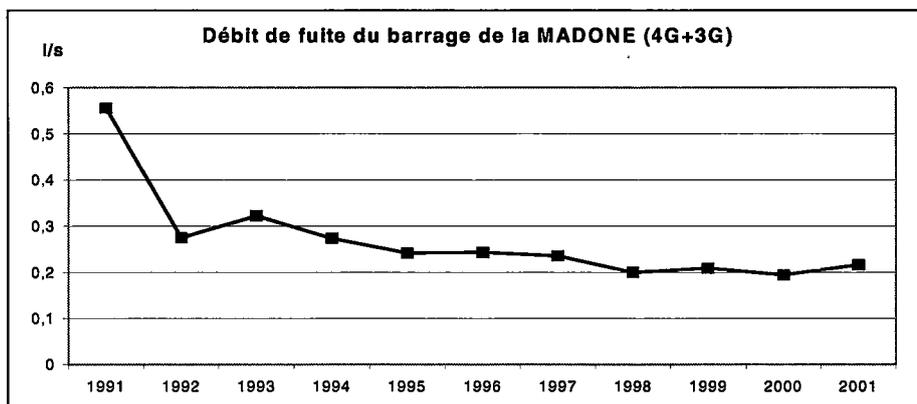


Barrage de la Madone : coupe type de l'étanchéité

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 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 11 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.

2.8 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 2000 m² de surface, posé sur le parement amont de fruit 1,7 :

- béton de peau, percollé à travers les enrochements ;
- 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. A 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.

3. Barrages non auscultés

3.1 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 3 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 90 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.

3.2 Barrage de COURNAURON (NERIS)

Servant à l'alimentation en eau potable de la commune de Nérès 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) ;
- dalles de protection en béton 1 m x 0,8 m x 0,04 m munies d'évents.

L'étanchéité est prolongée en fondation par un parafoiille 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 dalles 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. A 7,5 m de profondeur, ce dépôt atteignait une épaisseur de 20 à 30 cm.

Une inspection visuelle faite par SAFEGE 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 dalles 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.

3.3 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 para fouille creusé en fondation et rempli 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 20 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.

3.4 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 micaschiste (sables gravo-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, 5 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 entonnement. 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 2 drains placés sur les versants sont secs ou présentent un débit faible (inférieur à 1 l/min) ;
- les 3 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 20 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.

4. Conclusions

Plus de 30 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.

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.

Références

[1] 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, pp 10.1 à 10.16.

[2] 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, pp 9.1 à 9.9.

[3] 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 : 129-143. England: Elsevier.

Réhabilitation par géomembranes des barrages de l'Échapre et du Rouchain

Rehabilitation with geomembranes of Echapre and Rouchain dams

Olivier CRÉPON et Michel LINO
ISL Bureau d'Ingénieurs-Conseils

Résumé : L'article présente deux expériences récentes de réhabilitation d'étanchéité de barrage par géomembrane. La première concerne le barrage poids en maçonnerie de l'Echapre (h=34 m) où une technologie innovante a été mise en œuvre pour la fixation d'une membrane PVC sur le parement amont. La seconde présente l'utilisation d'une membrane PVC protégée par des dalles de béton ancrées pour la rénovation du masque amont en béton armé du barrage du Rouchain (h=55 m). La conception et les travaux réalisés sont décrits, de même que l'effet sur le comportement du barrage. Les leçons à tirer des deux expériences sont mises en lumière.

Abstract: *The paper presents two recent experiences of waterproofing of dams using geomembrane. The Echapre masonry dam (h=34m) has been watertight with a PCV geomembrane. An innovative solution was selected to fix the membrane. The reinforced concrete face of the Rouchain rockfill dam (h=55m) was repaired with a PVC geomembrane protected by bolted concrete slabs. The design and works are described as well as the effect on the dam behavior. Lessons from the two experiences are proposed.*

Mots-clés : barrages, réhabilitation, géomembrane, travaux, résultats

Keywords : dams, rehabilitation, geomembrane, works, lessons

Introduction

La technologie des géomembranes s'est largement imposée au cours des 10 dernières années dans la réhabilitation des étanchéités de barrage, principalement pour les barrages rigides (béton ou maçonnerie) mais aussi pour les barrages en remblai à masque amont.

L'objet du présent article est de rapporter l'expérience acquise par ISL dans ce domaine à l'occasion du confortement du barrage poids en maçonnerie de l'Echapre et de la réparation du masque amont en béton armé du barrage du Rouchain.

1. Le barrage de l'Echapre

1.1 Présentation

Le barrage de l'Echapre est situé sur la bordure nord-ouest du Massif du Pilat dans le département de la Loire à 10 km au sud-ouest de Saint-Etienne. C'est un barrage poids en maçonnerie légèrement arqué construit en 1895. La ville de Firminy est le propriétaire et l'exploitant du barrage pour son alimentation en eau potable. Les caractéristiques principales du barrage sont les suivantes :

□ hauteur au-dessus du terrain naturel	34 m
□ longueur en crête	160 m
□ largeur du couronnement	3,60 m
□ parement amont	vertical
□ fruit du parement aval	0,75
□ superficie du parement amont	3 500 m ²
□ volume de la retenue	930 000 m ³
□ surface du bassin versant	16 km ²

Un dispositif d'auscultation comprenant le relevé de niveaux piézométriques et de fuites a été mis en place en 1984. L'analyse régulière des mesures d'auscultation a permis de mettre en évidence la présence d'eau dans le barrage et de montrer que pour les plus hauts niveaux de la retenue, les pressions d'eau dans le barrage compromettaient la stabilité de l'ouvrage. En outre en 1994, une inspection sub-aquatique du parement du barrage a confirmé des défauts de l'enduit d'étanchéité du parement amont. Ces différentes considérations ont conduit la ville de Firminy à réaliser en 1997 des travaux restaurant l'étanchéité du parement amont et de la fondation.

Au niveau de l'étude d'avant projet, plusieurs solutions d'étanchement du parement amont ont été envisagées et étudiées d'un point de vue technique et financier. Le choix s'est finalement porté sur un étanchement par géomembrane PVC.

1.2 Description des travaux

Les travaux d'étanchement du parement amont ont été réalisés dans le cadre plus général de travaux d'un montant total H.T. de 5 MF [760 000 EUR] qui ont consisté en :

- ❑ la vidange de la retenue et la mise hors d'eau complète du parement amont ;
- ❑ le traitement de la fondation rocheuse (gneiss) par injection à partir d'une plinthe en béton armée construite au pied du parement amont ;
- ❑ la mise en place d'un rideau de drainage à l'aval du voile d'étanchéité ;
- ❑ la mise en place d'un complexe géotextile-géomembrane fixé mécaniquement sur toute la surface du parement amont ;
- ❑ la mise en place de neuf capsules piézométriques à corde vibrante destinées à la mesure des pressions totales d'eau dans le corps de la maçonnerie du barrage et de la fondation ;
- ❑ la réfection de l'étanchéité de la crête par une géomembrane bitumineuse.

Concernant les travaux de mise en place de la géomembrane, il convient de noter qu'à quelques adaptations près, c'est la solution de base décrite dans le dossier de consultation qui a été reprise par l'entreprise.

1.2.1 Préparation du parement amont et mise en place des éléments de drainage

Le parement amont du barrage de l'Echape est recouvert d'un enduit d'épaisseur 3 à 4 cm parfois armé par un grillage.

Compte tenu du relativement bon état mécanique du parement et la solution géomembrane PVC tolérant certaines irrégularités ainsi qu'une rugosité de la surface d'appui, la préparation du parement amont a consisté en :

- ❑ un nettoyage au jet d'eau sous forte pression (plusieurs dizaines de MPa) ;
- ❑ une réparation des défauts les plus grossiers ayant pour but d'ôter du parement les parties non adhérentes et de colmater les cavités trop importantes.

Le dispositif de drainage mis en place comprend les éléments suivants :

- ❑ une géogrille en polyéthylène de densité 750 g/m² fixée mécaniquement sur toute la surface du parement amont pour assurer un drainage efficace entre la géomembrane et le parement amont ;
- ❑ un drain collecteur en PEHD de hauteur 1 m et d'épaisseur 7 cm placé en pied de barrage, immédiatement au-dessus de la plinthe en béton armé (voir figure 2) ;
- ❑ quatre forages traversant le corps du barrage permettant d'évacuer les éventuelles venues d'eau de condensation, d'infiltration ou de fuites. Ces forages conduisent à délimiter cinq compartiments indépendants permettant ultérieurement de localiser l'origine de fuites éventuelles.

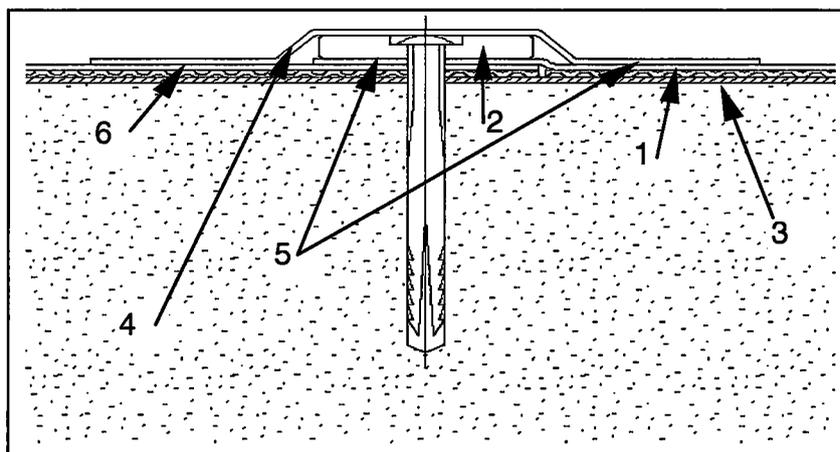
1.2.2 Mise en place de la géomembrane

Le choix s'est porté sur une géomembrane PVC d'épaisseur 2 mm armée d'une grille polyester et stabilisée aux U.V.. Cette membrane est contrecollée en usine sur un géotextile antipoinçonnant polyester de 500 g/m².

Les travaux de mise en place du complexe géotextile-géomembrane comportent les étapes suivantes :

- ❑ le complexe fixé en partie haute est déroulé par lés de 2 m de largeur jusqu'à la base du barrage,
- ❑ au droit des recouvrements verticaux, les deux lés sont soudés entres eux et un profilé plat vinylester 59 x 8 mm² fixé au barrage par des chevilles mécaniques plaque l'ensemble des deux lés contre le parement ;
- ❑ une bande de géomembrane PVC soudée de part et d'autre du profilé assure son recouvrement et son étanchéité.

Les détails de fixation du complexe géotextile-géomembrane au droit des montants verticaux sont représentés sur la figure n°1 et la photo n°1.



- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| (1) Complexe géotextile-géomembrane | (4) Geomembrane PVC |
| (2) Profilé plat vinylester | (5) Soudure réalisée sur site |
| (3) Géogrille polyéthylène | (6) Soudure réalisée en usine |

Figure 1 : Détails de fixation du complexe géotextile-géomembrane

Le contrôle continu de l'ensemble des soudures réalisées sur site demandé à l'entreprise a été réalisé à la « pointe sèche » pour les soudures entre deux lés et au test diélectrique pour les soudures de la bande de géomembrane PVC. Pour limiter les longueurs de soudures réalisées sur site (et donc de contrôle), les lés ont été approvisionnés avec sur un de leurs bords une bande de géomembrane PVC soudée en usine.

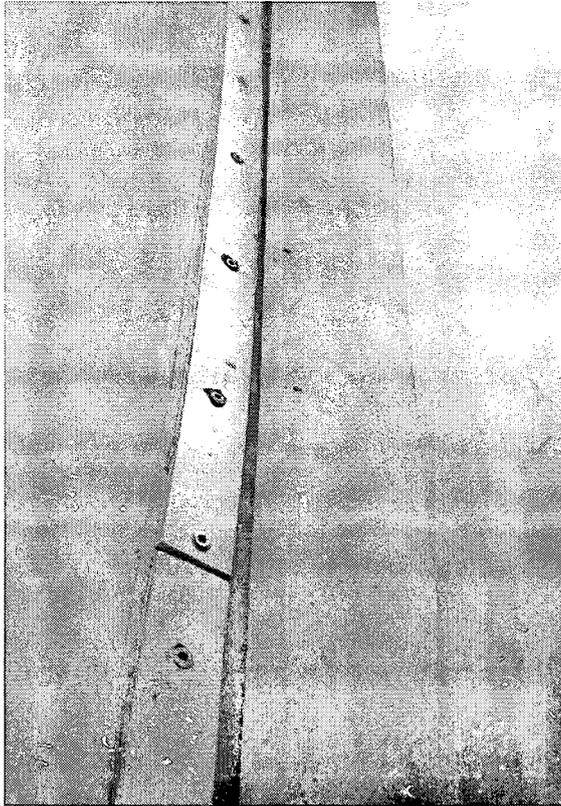


Photo 1: Barrage de l'Echapre - Profilé vertical au droit du recouvrement de deux lés

1.2.3 Fixations périmétrales

Les différents raccords du complexe géotextile-géomembrane concernent les fixations en pied et en crête du barrage. Les ouvrages de vidange et de prise d'eau étant localisés dans une galerie en fondation qui débouche à l'amont du barrage, il n'y a pas de raccords spécifiques à ces ouvrages.

La fixation de la géomembrane en pied permet une double fermeture :

- le complexe géotextile-géomembrane est plaqué contre la plinthe en béton de pied par un profilé plat vinylester 59 x 8 mm² fixé par des chevilles mécaniques équipées de rondelles étanches. Entre le profilé et la plinthe, un joint en mastic souple (butyl) écrasé empêche les infiltrations d'eau ; un mastic polyuréthane recouvre l'arête supérieure pour renforcer l'étanchéité. La fixation en crête qui est réalisée au tout début de la mise en place de chaque lé est reprise en fin de pose afin de tendre au maximum le lé.

- Des événements de dégazage sont placés tous les 8 m sur toute la longueur de façon à permettre une bonne ventilation de la sous-face du complexe géotextile-géomembrane et à chasser l'air lors des montées du niveau du plan d'eau.
 - le complexe géotextile-géomembrane est ensuite soudé sur un waterstop PVC de surface coulé au niveau de la face amont de la plinthe (voir figure 2).
- Cette disposition permet en outre d'augmenter les lignes de fuites (et donc diminuer les gradients) entre l'extrémité amont de la géomembrane et le drain exutoire.

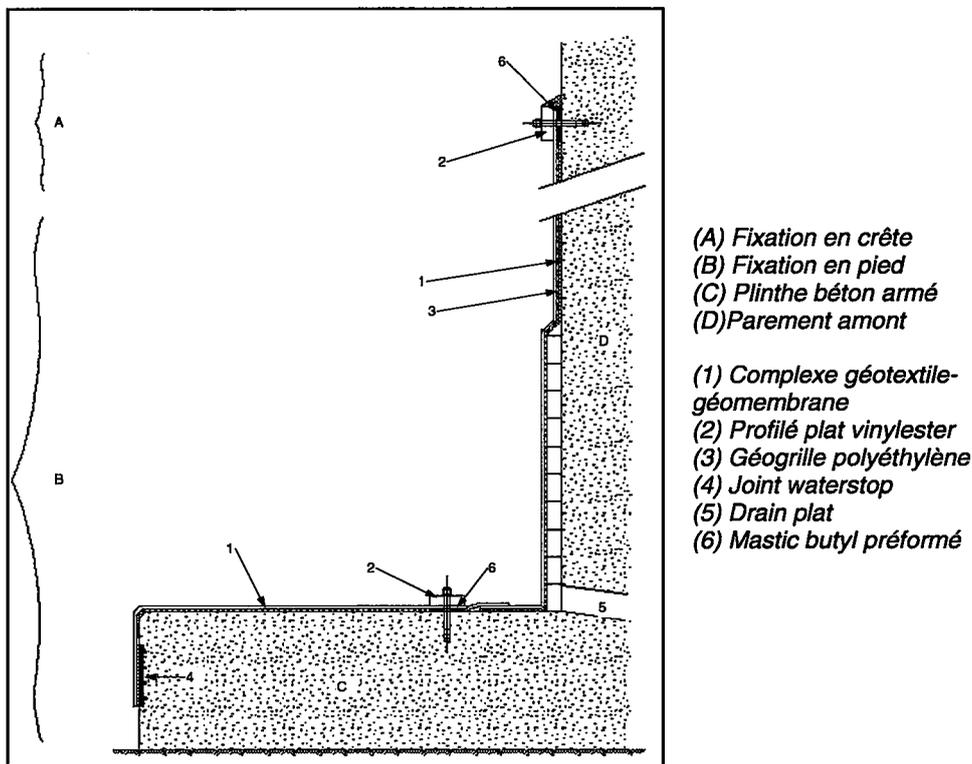


Figure 2 : Détails de fixation du complexe géotextile-géomembrane en crête et en pied

1.2.4 Analyse des travaux et conditions de réalisation

De façon générale, le chantier s'est déroulé dans de bonnes conditions. La mise en œuvre des procédés décrits ci-dessus n'a pas posé de problème spécifique à la solution.

Néanmoins, certaines phases de travaux se sont avérées parfois délicates à réaliser et ont fait l'objet d'une attention particulière :

- la bonne réalisation des bétons de la plinthe en pied du parement amont et de l'ancrage du waterstop en particulier conditionne en partie la bonne fermeture du complexe géotextile-géomembrane en pied du barrage ou les pressions d'eau sont maximales,
- la reprise en fin de pose de chaque lé des fixations en crête permet de tendre le lé et de limiter ultérieurement la formation de plis.

Inhérent au principe de la solution (complexe géotextile-géomembrane), les difficultés rencontrées ont été essentiellement d'ordre climatique :

- dans la section la plus haute du barrage, la longueur des lés est supérieure à 30 m. La bonne mise en place de ces lés a imposé une quasi absence de vent,
- les soudures étant autorisées uniquement pour des températures extérieures dans la plage +5°C/+35°C, la réalisation d'une partie des travaux durant les mois de novembre et décembre a conduit à des arrêts parfois importants qui ont pénalisé l'avancement du chantier.

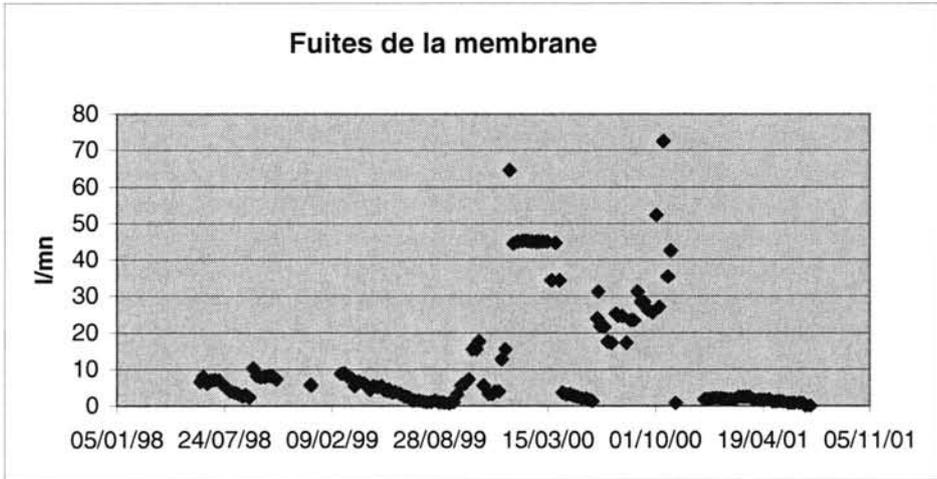
1.3 BILAN DES TRAVAUX

Les travaux d'étanchement du parement amont se sont terminés en décembre 1997. La mise en eau du barrage s'est effectuée de façon satisfaisante durant l'hiver 1997-98.

L'analyse des mesures d'auscultation montre clairement l'efficacité des travaux réalisés. En particulier, le niveau piézométrique dans le barrage, mesuré dans trois profils amont aval de 3 piézomètres a été fortement rabattu. Les 3 piézomètres dans le corps du barrage montrent une piézométrie basse. Seul un piézomètre de fondation, implanté en vallée, continue de donner une piézométrie relativement haute.

Le graphique ci-après montre l'évolution des fuites collectées dans le système de drainage de la membrane.

Une fuite significative est apparue lors du deuxième remplissage. Cette fuite atteint 72 l/min en octobre 2000. Le cloisonnement du système de drainage en 5 panneaux a permis de localiser la zone incriminée correspondant à une déchirure ponctuelle de la membrane. Une réparation par plongeurs a alors été effectuée ramenant le niveau de fuite à une valeur négligeable.



La solution retenue pour l'étanchement du parement amont est jugée satisfaisante aussi bien dans son principe (choix d'une géomembrane PVC) que dans ses détails de réalisation (fixation sans tension, mise en place de profilés verticaux viny-lester). Elle représente en outre un avantage économique significatif par rapport à la solution plus classique et brevetée de membrane tendue.

Quelques défauts de mise en œuvre ont été constatés mais ils ont pu être réparés sans difficultés. Il est toutefois incontestable que la pose sans tension est plus délicate que pour la membrane tensionnée. En particulier, l'apparition de plis est difficilement évitable. Ce risque est d'autant plus grand que le barrage est haut. Il est également lié aux conditions météorologiques (vent) pendant le chantier.

Ces plis sont inesthétiques lorsqu'ils affectent la partie visible du parement. Ils constituent éventuellement une zone de vieillissement préférentiel même si on ne dispose pas aujourd'hui d'éléments probant de jugement de cet effet.

La photo suivante montre l'état du parement amont en fin de travaux.

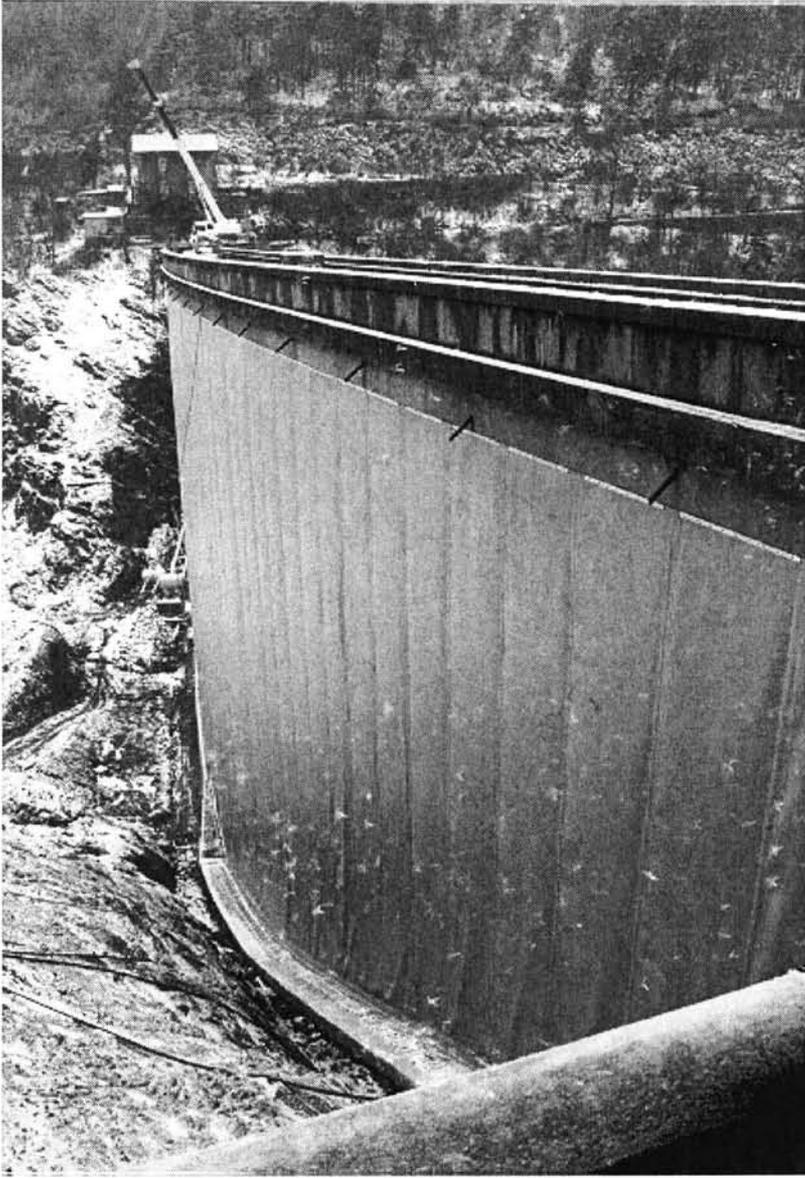


Photo 2 : Barrage de l'Echape - vue d'ensemble du parement amont

2. Le barrage du Rouchain

2.1 Historique sommaire

Le barrage du Rouchain est un barrage en enrochements compactés à masque amont en béton armé qui a été construit en 1976. Sa hauteur maximale sur la fondation est de 55 m.

Dès la première mise en eau, le barrage présente des fuites très élevées qui ne permettent pas son remplissage (250 l/s à 20 m sous la retenue normale). Des travaux limités à la réparation du masque fracturé autour de la tour de prise d'eau en 1978 ne donnent pas satisfaction. En 1981-1984, des travaux de réfection importants sont engagés :

- pose d'une membrane Rodio (géotextile imprégné) sur le parement amont et sur la plinthe. Le raccordement sur la tour de prise d'eau s'effectue par un joint « lyre »,
- injections dans la plinthe et dans le rocher en rive gauche.

Ces travaux ont permis de réduire le débit de fuite à 20 l/s sous la cote de retenue normale et d'exploiter normalement le barrage jusqu'en 1999. Mais la membrane Rodio, non protégée, présente des dégradations alarmantes (zones décollées et arrachées au voisinage de la cote de retenue normale, perforation par les chutes de pierres) qui font craindre pour la pérennité de l'étanchéité. En 1998, le Maître d'Ouvrage engage le projet de réfection du barrage.

2.2 Description des travaux de 1999-2000

Les travaux d'étanchement réalisés en 1999-2000 ont consisté à remplacer la membrane Rodio par une membrane PVC de 2 mm d'épaisseur protégée par un revêtement en béton armé.

La membrane est posée en non-adhérence et simplement fixée en tête et en pied de parement par serrage sous des plats en acier inoxydable. Un géotextile anti-poinçonnement et de drainage est assemblé en usine sur la face inférieure de la membrane.

Les travaux ont consisté en :

- l'élimination de la membrane Rodio dans les zones où elle était décollée ou dans les zones où elle masquait des irrégularités trop importantes du masque en béton armé (marches au droit des joints de fractionnement),
- la reprise par ragréage au mortier des irrégularités du support, le comblement au mortier des joints de fractionnement « ouverts » dans lesquels la membrane risquait d'être poussée,

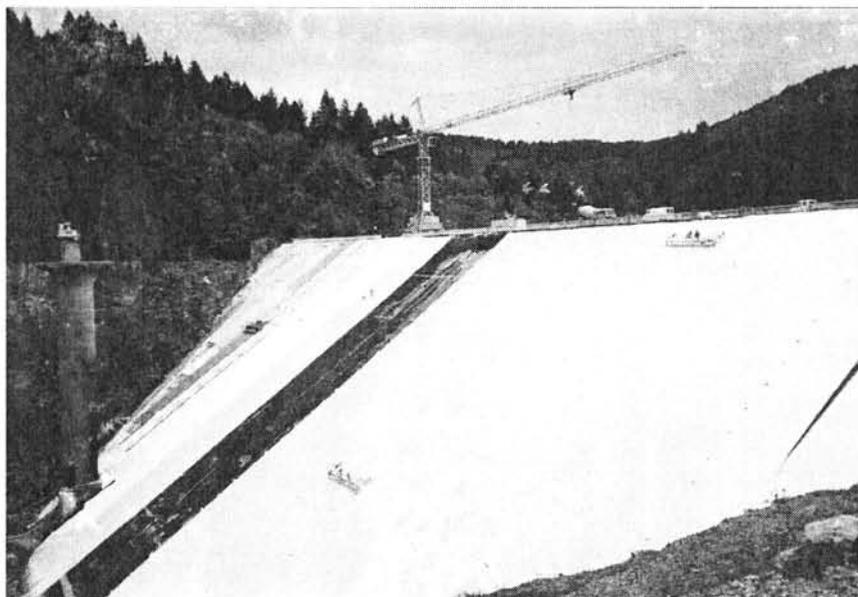


Photo 3 : Barrage du Rouchain - réfection du masque amont par géomembrane protégée

- ❑ la pose des lès de membrane PVC et la réalisation des fixations haute et basse,
- ❑ la réalisation des ancrages pour la protection en béton armé,
- ❑ la pose d'un géotextile anti-poinçonnement sur la membrane,
- ❑ la construction du revêtement en béton armé.

La forte pente du parement amont (1,4 H/1 V) a nécessité d'ancrer la protection de la membrane dans le masque en béton armé. Ces ancrages sont constitués de cornières en acier inoxydable, fixées après la pose de la membrane par boulonnage sur des chevilles chimiques de gros diamètre. Une plaque en acier inoxydable est interposée entre la cornière et la membrane de façon à répartir les contraintes et éviter le poinçonnement de la membrane sous les ailes de la cornière. Une pièce de membrane rapportée, soudée en périphérie sur le lé de membrane recouvre la plaque. L'étanchéité autour de la vis de fixation est assurée :

- ❑ par un joint bi-adhésif posé entre la plaque et la pièce de membrane recouvrant la plaque,
- ❑ un joint caoutchouc posé entre la pièce de membrane et la cornière,
- ❑ une rondelle caoutchouc percée plein trou interposé entre la cornière et la rondelle en acier inox sous écrou,
- ❑ un cachetage au mastic silicone entre l'écrou et la vis.



Photo 4 : Barrage du Rouchain - Essai d'étanchéité des soudures autour d'un ancrage de la protection en béton armé

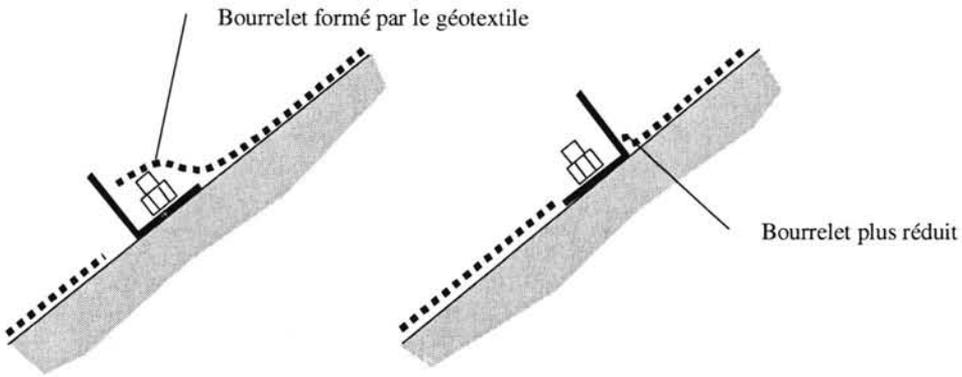
La protection en béton, armé d'une seule nappe de treillis soudé à 15 cm d'épaisseur. Elle a été construite en utilisant un « outil coffrant », halé suivant le rampant du parement, qui permettait la réalisation « en continu ».

Autour de la tour de prise d'eau, la membrane est fixée sur un châssis métallique assemblée sur site et scellé dans le béton de la tour.

La sous-face de la membrane est drainée par le géotextile inférieur, et par une bande horizontale de géogrille spécifique posée au niveau de l'exutoire. L'exutoire du drainage débouche dans la chambre de vannes située au pied de la tour. Il est équipé de vannes et d'un piquage permettant la mesure du débit de fuite. La partie du masque située au-dessous du niveau de l'exutoire est lestée par un remblai de pied.

2.3 Enseignements

Les premiers ancrages ont été posés avec la cornière tournée vers le bas. On s'est vite aperçu que cette disposition diminuait la qualité de l'ancrage dans le béton de la protection par suite du « bourrelet » qui apparaissait inmanquablement dans le géotextile après le début du bétonnage (qui met en tension le géotextile). Les cornières ont ensuite été posées dans l'autre sens.



Dans la partie la plus haute du barrage, la protection en béton a été réalisée en 2 phases :

- 1) le haut avec approvisionnement par une grue à tour installée en crête,
- 2) la base avec approvisionnement par une grue automotrice installée au pied du barrage.

Lors de la première phase, la base des « bandes » était coffrée en appui sur une ligne d'ancrage pour supporter le poids du béton frais. On a constaté une fissuration systématique de 1 à 2 lignes d'ancrages (exceptionnellement 4) car cet appui n'était pas suffisamment rigide et autorisait un certain glissement du béton.



Photo 5 : Barrage du Rouchain - Fissuration au droit d'un ancrage de la protection de la membrane

Les parties fissurées ont été repiquées et ragrées une fois que la protection a été totalement réalisée et durcie.

Au sommet de certaines « bandes » de protection, on a constaté une fissuration longitudinale découpant un « coin » de béton en contact avec le masque en béton armé :

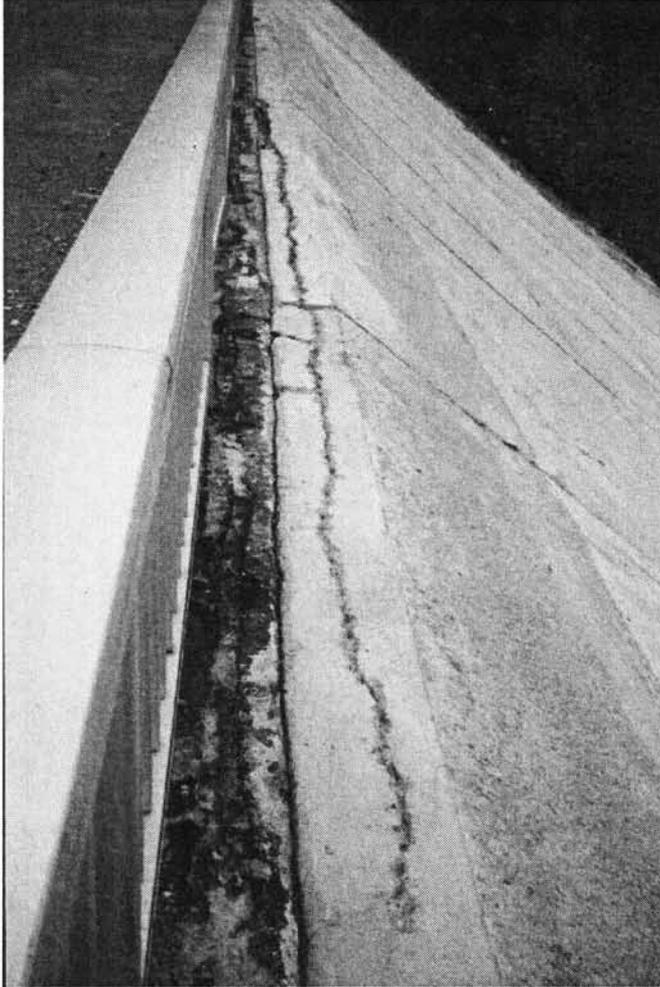
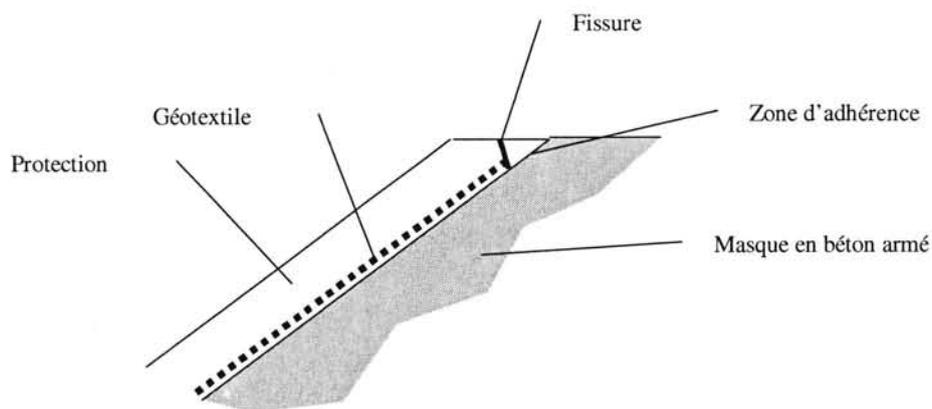


Photo 6 : Barrage du Rouchain - Fissuration au sommet de la protection de la membrane

Cette fissuration résultait de l'adhérence du béton de la protection sur le masque d'origine lorsque le géotextile de protection de la membrane était coupé trop court avant le bétonnage et n'atteignait pas le sommet du masque (la membrane s'arrêtant elle-même environ 50 cm sous l'arase).



Une mesure très simple a suffi à supprimer ce désordre : le géotextile n'a été coupé qu'après le bétonnage.

Toute pluie significative rend le bétonnage impossible sur une hauteur de parement aussi importante : l'eau ruisselant sur la membrane s'accumule en une poche sous le géotextile en avant du front de bétonnage. Cette poche finit par passer sous l'outil coffrant.

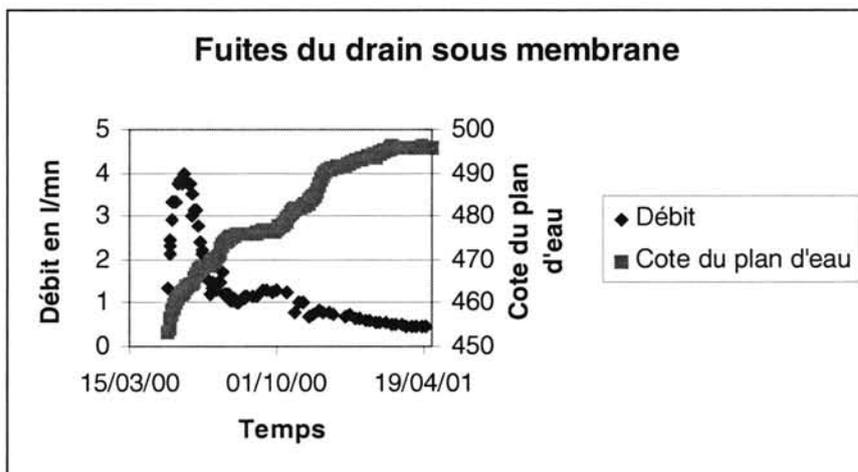


Photo 7 : Barrage du Rouchain - Désordre dans la protection lors d'une tentative de bétonnage par temps de pluie

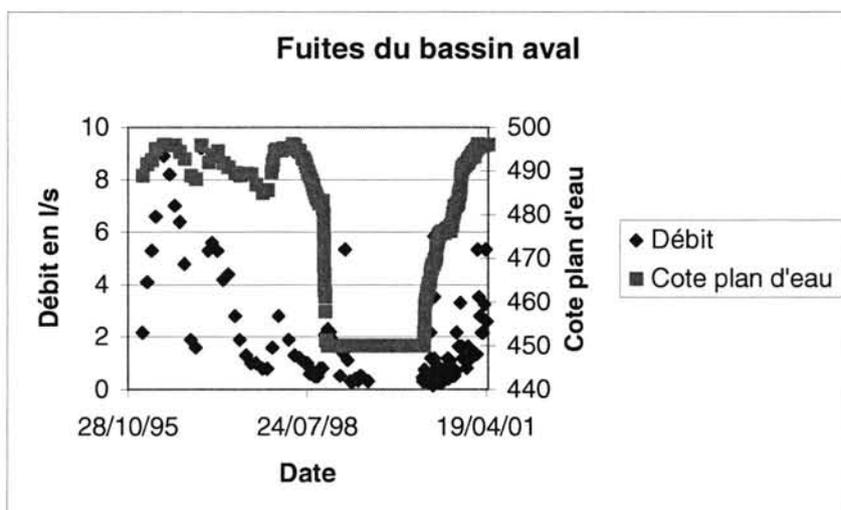
2.4 Comportement du barrage

Le barrage a été mis en eau en mai 2000. Il a atteint sa cote de retenue normale en mars 2001 et a un comportement tout à fait satisfaisant.

Le débit du drainage sous la membrane, après une phase de croissance en début de remplissage, a fortement diminué, sans doute en raison du colmatage des interstices qu'il alimente. Il est actuellement inférieur à 1 litre par minute.



Le graphique ci-après montre l'évolution des fuites recueillies dans le bassin aval. Ces fuites restent relativement élevées et proviennent pour l'essentiel du drainage de la fondation.



3. Conclusion

L'utilisation des géomembranes pour l'étanchement des parements amont de barrage est une technique parfaitement maîtrisée et qui a donné de façon générale d'excellents résultats pour des coûts de travaux généralement compétitifs par rapport aux solutions concurrentes.

L'étanchement réalisé est généralement très efficace et l'impact sur le comportement et la sécurité du barrage est immédiat.

La durée de vie de tel masque peut être estimée de façon prudente à une trentaine d'années sur la base du comportement des ouvrages en service, en particulier en Italie. En France, le retour d'expérience est d'une vingtaine d'années et confirme la pertinence de ce type de solution.

La localisation extérieure de l'organe d'étanchéité permet dans tous les cas d'envisager une réparation en cas d'altération à long terme de l'étanchéité du masque.

Barrage de la Rive : confortement par géomembrane d'un barrage ancien

La Rive dam: rehabilitation with geomembrane of old dam

Pierre AGRESTI, Alain YZIQUEL
SOGREAH
6, rue de Lorraine
38130 Echirolles

Résumé : Le barrage de LA RIVE est un barrage de type poids en maçonnerie construit en 1866. Il a fait l'objet d'une réhabilitation complète par géomembrane en 1999-2000. L'article présente les travaux de confortement.

Abstract: *La Rive is a masonry gravity dam built in 1866. This dam has been recently rehabilitated using a synthetic geomembrane.*

Mots-clés : Barrage poids, maçonnerie, étanchéité, géomembrane PVC, confortement.

Keywords: *Gravity dam, masonry, waterproofing, PVC geomembrane, rehabilitation.*

1. Présentation des 3 barrages de Saint-Chamond

Pour assurer son alimentation la Ville de Saint-Chamond (Département de la Loire) dispose de 3 barrages construits sur le Giers et son affluent rive gauche le Ban.

Le barrage le plus ancien est celui de la Rive sur le Ban. Ce barrage en maçonnerie ayant une hauteur 48,3m et une longueur en crête de 165m a été construit de 1867 à 1871.

Pour faire face au développement de l'industrie métallurgique et textile, il a fallu construire en 1955 le barrage du Piney sur le Giers. Le barrage du Piney est un barrage voûte en béton.

Enfin, l'année 1968 a vu la construction du barrage de Soulages à l'aval de la confluence du Ban et du Giers. Le barrage de Soulages est un barrage à voûtes multiples en béton armé.

En raison de la baisse des activités industrielles traditionnelles, les capacités des trois réservoirs sont maintenant excédentaires pour les besoins présents de la Ville de Saint Chamond.

Etre propriétaire de 3 barrages, en assurer la maintenance ainsi que les travaux de confortement représente une lourde charge financière pour une ville de la taille de Saint Chamond.

2. Historique des évènements

Dès la période 1975-1977, la ville de Saint-Chamond a engagé les études du confortement du barrage de La Rive qui était alors plus que centenaire. Ces premières études concluaient à la nécessité de mettre en place un dispositif d'instrumentation pour ce barrage poids dont le profil et l'absence de drainage permettait de penser qu'il ne satisfaisait pas les critères habituels de stabilité.

En 1989, les mesures piézométriques réalisées sur le barrage de la Rive ont conduit SOGREAH à recommander un abaissement du niveau de retenue normale de 5m.

En 1990 la révision des études hydrologiques a conclu à la nécessité de vider le barrage. Il n'était en effet pas possible de garantir la consigne d'exploitation à niveau bas. A partir de cette date la capacité de stockage pour l'alimentation en eau de la Ville de Saint Chamond était donc assurée par le barrage du Piney et celui de Soulages.

En 1992, nous avons réalisé l'Avant Projet du confortement de la Rive.

En 1993, suite aux crues du mois d'octobre le niveau de sécurité a été dépassé montrant que les capacités de vidange étaient insuffisantes même à retenue vide.

En 1994, le percement du barrage de la Rive fut réalisé et le barrage mis en sécurité effective pendant le mois de décembre. Ces travaux de percement anticipaient de fait la transformation en vidange de fond si le barrage devait être réhabilité. Ces travaux furent les premiers investissements important pour la ville de Saint Chamond.

En mars 1996, un incident détecté par l'auscultation du barrage du Piney conduit le Maître d'Ouvrage à adopter une réduction du niveau du plan d'eau de ce barrage. A cette époque, la ville de Saint Chamond ne disposait plus de la capacité de stockage suffisante pour garantir la sécurité de son alimentation en eau. Nous avons alors chiffré deux possibilités de réhabilitation : celle du barrage de la Rive et celle du Piney. Compte tenu des incertitudes sur l'état du barrage du Piney, de l'avancement des études du barrage de la Rive et du percement déjà réalisé, il fut décidé par la Ville de Saint-Chamond de réhabiliter le barrage de la Rive et de vider le barrage du Piney.

En février 1999, les travaux de confortement du barrage de la Rive commencèrent pour s'achever en mars 2000. En Juin 2000 le réservoir était à nouveau plein et la Ville de saint Chamond disposait des capacités suffisantes à son alimentation en eau.

3. Confortement du barrage de la Rive

3.1. Barrage

Le projet de confortement du barrage de La Rive fait l'objet d'un dossier de soumission au Comité Technique Permanent des Barrages (Avril 1998). Le principe adopté est un confortement par réfection du parement amont par membrane. De par les caractéristiques du barrage, ce projet est très semblable à la réhabilitation du barrage de CHARTRAIN, également situé dans la Loire.

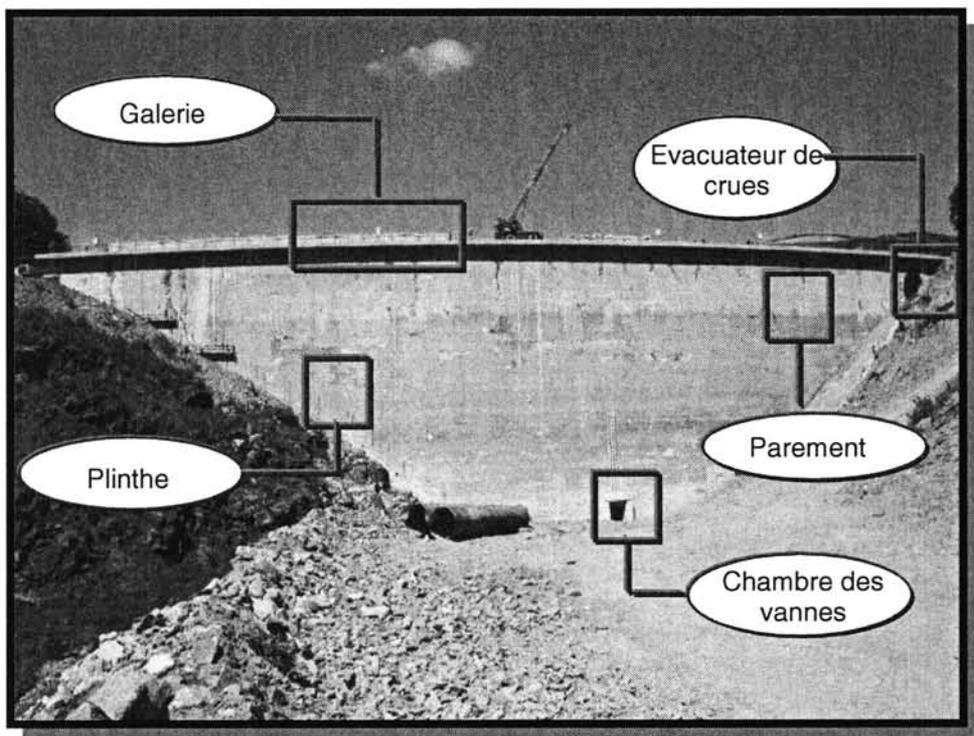


Fig. n° 1 : Vue générale du parement amont avant travaux

3.1.1. Modification du projet en fond de vallée

Lors des travaux d'excavation du barrage de la Rive, il est apparu pendant la réalisation des pistes d'accès dans la retenue que les matériaux constituant le culot du réservoir en dessous du niveau minimum de la vidange de fond étaient principalement constitués de silt et de vases.

Le projet soumis à l'approbation du CTPB prévoyait deux types d'étanchéité :

- une étanchéité par membrane dans la zone située au dessus de la vidange de fond où des réparations ultérieures étaient envisageables ;
- une étanchéité par masque en béton armé dans la zone située en dessous de la vidange de fond.

Ce projet supposait que l'Entrepreneur excavait 3 500 m³ de matériau de remplissage.

Les conditions rencontrées conduisaient l'Entrepreneur à proposer l'excavation de 10 000 m³ de matériau. Le surcoût de l'ensemble de ces travaux a été estimé à 1,1MF.

Compte tenu des conditions rencontrées - vases et silts au pouvoir colmatant important mais aussi enduit, qui n'a pas été soumis à des cycles de dessèchement humidification et de gel dégel, en bon état - le masque en béton a été supprimé et le système d'étanchéité a été adapté en fond de vallée.

Cette modification, soumise à l'avis du BETCGB, a été approuvée le 30 juin 1999.

Le principe de cette modification d'étanchéité est rappelé brièvement ci-après.

La plinthe qui est horizontale sur les rives est retournée verticalement sur le parement amont pour les 42 m de fond de vallée.

Cette plinthe est ancrée et un bulbe d'injection est réalisé dans la maçonnerie pour allonger le chemin de percolation.

Le voile d'injection est réalisé dans le corps du barrage et dans la fondation. L'injection dans le rocher est inchangée et réalisée à partir de la plinthe. L'injection dans le corps du barrage est réalisée avec une limitation de la pression et du volume injecté de façon à ne pas souffler l'enduit existant.

Le voile de drainage a été réalisé en dernier lieu. Ce voile est vertical.

Cette modification repose sur deux hypothèses principales, à savoir :

- les matériaux de remplissage ont un pouvoir colmatant élevé ;
- l'enduit est en bon état.

Ces hypothèses ont été vérifiées par des sondages et essais réalisés au préalable, par l'analyse des résultats de l'injection en temps réel pendant les travaux et par les mesures des sous-pressions durant le remplissage.

3.1.2. Traitement de la fondation

3.1.2.1. Travaux d'injection

En pied amont un rideau d'injection est foré et injecté au travers d'une plinthe périmétrale. Cette plinthe construite en béton armé est ancrée au rocher sur une profondeur de 4 mètres afin d'autoriser des pressions d'injection importantes en surface. Le complexe d'étanchéité se ferme sur la plinthe périmétrale par une liaison mécanique.

Le rideau d'étanchéité est constitué d'un voile unique jusqu'à une profondeur de 20 mètres en profondeur et de 10 mètres en rive. Ce voile est réalisé suivant le principe habituel, primaire systématique tous les 6 mètres foré et injecté, secondaire systématique alterné tous les 6 mètres foré et injecté, tertiaire alterné en fonction des résultats obtenus sur les secondaires. Tous les forages primaires et secondaires ont été testés au moyen d'un essai Lugeon.

Les forages sont situés sur un cylindre parallèle au cylindre de référence du barrage.

Sur ce cylindre, les forages sont orientés afin de recouper au mieux les 2 familles principales de discontinuités, à savoir :

- pour la rive gauche, le forage est incliné vers la rive avec un angle de 30 degrés par rapport à la verticale ;
- pour la rive droite, le forage devrait être incliné vers la rive avec un angle de 55 degrés par rapport à la verticale ; compte tenu de considérations pratiques d'exécution et de la prédominance des joints verticaux dans la perméabilité générale de l'appui rive droite, un angle de 30 degrés a été retenu.

Pour le fond de vallée, les principes ci-dessus sont retenus avec une zone de raccordement sous l'ouvrage de vidange où il faut composer avec la géométrie des ouvrages par l'adoption d'orientations variables.

Les forages sont réalisés depuis le dessus de la plinthe.

Des tubes en attente en PVC ont donc été incorporés tous les 2,5 m dans la plinthe afin d'éviter d'endommager aciers et ancrages.

3.1.2.1.1. Injections dans la maçonnerie

L'injection du voile dans la maçonnerie a été réalisée par tranche de 2,5 m afin de mieux contrôler volumes et pressions. Les 2 premières tranches sont injectées par gravité. Pour les tranches plus basses, compte tenu de la distance au parement et de la contrainte de pied amont créée par le poids du barrage à vide, une pression d'injection de 0,2 MPa a été adoptée.

3.1.2.1.2. Injection des contacts/consolidations (Mur de pied)

Les injections de contact/consolidation du mur de pied ont été réalisées avant la foration du voile d'étanchéité. Une procédure d'injection spéciale a permis de vérifier l'état de la maçonnerie et d'éviter le soufflage de l'enduit sous le niveau du mur de pied.

3.1.2.2. Travaux de drainage

La fondation du barrage est drainée par un rideau foré à partir de la chambre des vannes en partie basse. Sur les rives, il est difficile de forer les drains à partir de la chambre des vannes car les longueurs de forage deviennent excessives, trois séries de forages superposés sont donc réalisés à partir du pied aval du barrage, la série supérieure intercepte le contact avec un angle d'incidence faible, les deux séries inférieures drainent la fondation en profondeur avec un angle d'incidence plus important afin de rester à une distance suffisante du rideau d'injection. Le

dispositif de drainage a été adapté et renforcé en fonction des résultats des essais d'eau et de la campagne d'injection.

3.1.3. Etanchéité du parement amont

Le dispositif adopté est composé d'une membrane d'étanchéité et d'un dispositif de drainage associé sur le parement amont du barrage. Ce dispositif est très semblable au dispositif mis en œuvre avec succès sur le barrage de CHARTRAIN.

3.1.3.1. Préparation du parement

Au total, l'enduit a été enlevé sur environ 80% du parement amont. Les fissures larges ont été rebouchées au mortier et un enduit de réfection a été réalisé sur les portions les plus endommagées.

3.1.3.2. Membrane d'étanchéité

La membrane est une géomembrane PVC de 2,5 mm d'épaisseur retournée sur la plinthe et le mur de pied. Cette membrane est protégée au contact avec le parement par un géotextile 1500g/m² en partie haute et une géogrille en partie basse sous la côte 505.00 NGF. Ce complexe géotextile/géogrille est drainé par quatre collecteurs qui ramènent les eaux de drainage dans la nouvelle chambre des vannes (drains de membrane).

La mise en place de la membrane d'étanchéité a été réalisée par les équipes spécialisées de l'entreprise d'étanchéité. Les raccords à la plinthe et aux autres ouvrages en béton (évacuateur, bouchon, béton projeté en RG) sont réalisés par brides inox et collage à la résine.

Une particularité et un intérêt du système adopté réside dans le système de fixation de la membrane qui assure distinctement les fonctions de maintien et de mise en tension. Ce système permet d'éviter la formation de plis à la mise en eau.

Le complexe d'étanchéité est retourné sur la plinthe et le mur de pied.

Dans les zones vulnérables aux actes de vandalisme (partie supérieure des rives par exemple), le parement est traité par un béton projeté.

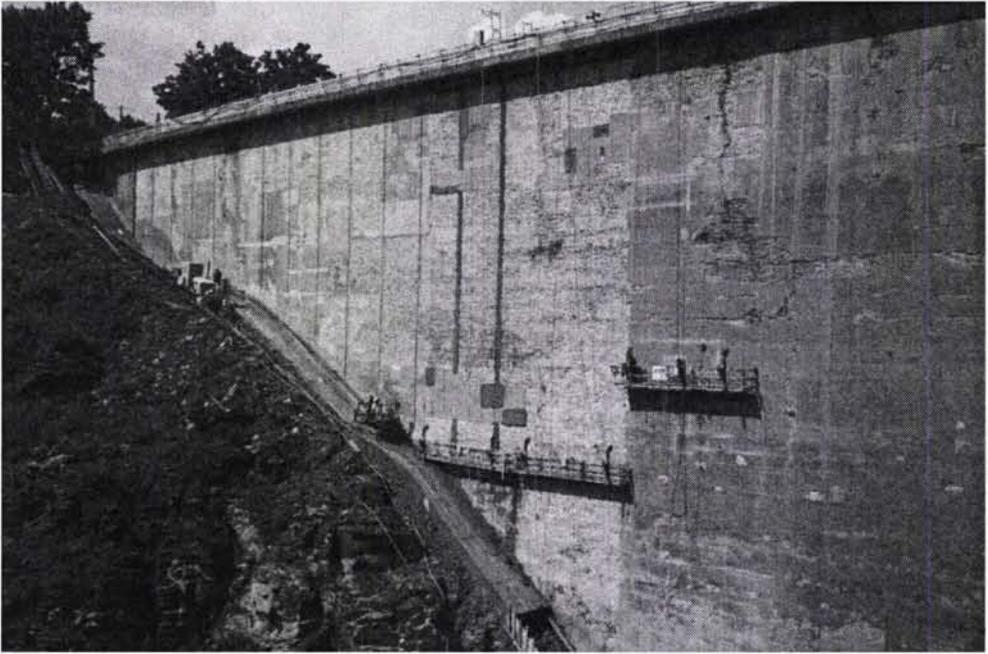


Fig. n°2 : Travaux de préparation du parement



Fig. n°3 : Mise en œuvre de la géomembrane. En blanc le géotextile, en noir la géogrille et en gris la membrane PVC

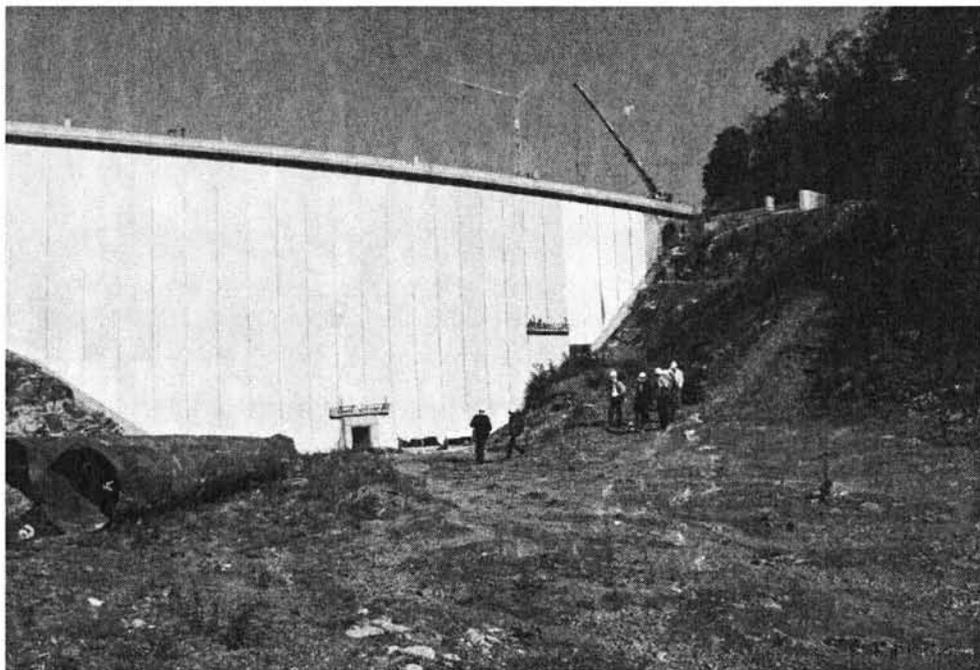


Fig. n°4 : Vue générale du parement amont avec membrane en cours de pose

3.1.4. Evolution de conception de la plinthe au niveau des joints

La plinthe périmétrale a été construite par panneaux de béton armé alternés de 5 à 7m de long. Généralement, les joints entre panneaux ont été traités avec un ruban d'étanchéité caoutchouc type Waterstop. Le joint Waterstop est ancré au rocher et recouvert d'une bande de géomembrane. Cette technique classique a été appliquée à tous les joints de la plinthe du barrage de CHARTRAIN. Elle donne satisfaction mais est lourde à mettre en œuvre car elle implique une contrainte de synchronisation des travaux de construction de la plinthe et de pose de la membrane.

Sur le barrage de LA RIVE, compte tenu du retour d'expérience du barrage de CHARTRAIN, la conception des joints a été simplifiée pour réduire le coût et le délai de réalisation. Les aciers longitudinaux traversent les joints de construction. La section d'acier au droit des joints de construction est réduite de façon à favoriser la localisation de la fissuration à cet endroit. La fissure attendue est suffisamment étroite pour qu'elle ne crée pas de fuite importante. Par mesure de précaution et pour limiter les éventuelles fuites qui pourraient se produire à travers ces fissures, un élément hydro-gonflant a été introduit.

3.1.5. Adaptation en pied d'ouvrage à LA RIVE

Le projet initial de confortement de LA RIVE prévoyait une étanchéité par masque épais en béton armé dans la zone située en dessous de la vidange de fond. Ces travaux nécessitaient l'enlèvement des matériaux constituant le culot du réservoir en dessous du niveau minimum de la vidange de fond.

Lors des travaux, il est apparu que ces matériaux étaient principalement constitués de silt et de vases au pouvoir colmatant élevé et que l'enduit, protégé par ces matériaux, était en excellent état.

Compte tenu des conditions rencontrées, le masque en béton a été supprimé.

Le principe de cette modification d'étanchéité consiste à retourner verticalement la plinthe périmétrale sur le parement amont en fond de vallée.

Cette plinthe est ancrée au parement amont du barrage. Des injections sub-horizontales de contact et une auréole de drains forée depuis la chambre des vannes permettent de contrôler les gradients hydrauliques dans le corps du barrage.

En fond de vallée, le voile d'injection est réalisé depuis le mur de pied dans le corps du barrage et dans la fondation. L'injection dans le corps du barrage est réalisée avec une limitation de la pression et du volume injecté de façon à ne pas souffler l'enduit existant.

L'auscultation des débits de drainage et des sous-pressions dans cette zone confirme l'efficacité de cette solution qui permet de réduire la complexité des travaux de dérivation provisoire et de limiter les impacts environnementaux et financiers engendrés par l'extraction des vases.

3.2. Evacuateur de crue

Le nouvel évacuateur de crue a une capacité de 80 m³/s. Il a nécessité le calibrage complet du chenal aval et de la chute ainsi que l'élargissement du passage à travers le barrage, conforté avec des tirants précontraints.

Dans un souci d'économie et d'impact visuel, la réception de la chute dans le chenal aval n'a pas été aménagée car les dommages causés par les crues ne concernent que les ouvrages annexes.

3.3. Bouchon, vidange de fond et prise d'eau

3.3.1. Bouchon

Durant les travaux, la rivière a été dérivée dans le pertuis de sécurité et dans les anciennes conduites de prise d'eau situées en rive gauche en amont du barrage.

L'étanchéité du bouchon a été réalisée par mise en place d'un joint auto-gonflant et injection du contact en voûte. Le drainage en aval du bouchon est assuré par l'auréole de drain réalisée depuis la nouvelle chambre des vannes.

3.3.2. Chambre des vannes

Une nouvelle chambre des vannes a été excavée dans le corps du barrage par sur-élargissement local du puits de sécurité. Compte tenu de l'excellente qualité de la maçonnerie rencontrée, seule la paroi amont de la chambre des vannes a été revêtue avec un béton projeté et lissé

La nouvelle chambre des vannes abrite la vidange de fond Φ 500mm et les vannes de la nouvelle prise d'eau. Les anciennes conduites de prise d'eau sont conservées comme organe de vidange supplémentaire.

3.4. Réfection de la crête – Galerie technique

L'occasion des travaux de confortement du barrage a été mise à profit pour refaire et élargir la route départementale passant sur la crête du barrage.

Les travaux d'élargissement nécessitaient la pose d'éléments en béton armé préfabriqués. Ces éléments interdisaient toute intervention future sur les canalisations prévues posées en tranché sur la crête du barrage. Le projet a donc été modifié et la trachée a été remplacée par une galerie technique circulant sous la nouvelle chaussée. Cette galerie est raccordée à des ouvrages d'extrémités en rive permettant l'accès et les interventions sur les conduites d'AEP et d'assainissement. En outre cette galerie permet la collecte et l'évacuation des eaux pluviales de chaussée.

3.5. Dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation, déjà renforcé en 1988-89, a été amélioré pour vérifier le comportement de l'étanchéité et tenir compte des nouvelles conditions de drainage de la masse du barrage.

Au cours de la réhabilitation récente de l'ouvrage le système d'auscultation a été repris et complété de la façon suivante :

3.5.1. Piézométrie

Avant la réhabilitation, la piézométrie dans l'ouvrage et en fondation était mesurée au moyen de 12 capteurs de pression interstitielle implantés sur 3 profils.

Il a été décidé de reprendre les mesures sur ces capteurs, avec les réserves qui s'imposent du fait de leur maintien en milieu non saturé depuis plusieurs années. Par ailleurs, la réhabilitation a été l'occasion de la mise en place de 4 nouveaux capteurs, implantés au contact maçonnerie-rocher, en fond de vallée, à partir de forages réalisés depuis la nouvelle chambre des vannes, sur 2 profils de grande hauteur.

Sur chacun de ces profils, 2 cellules ont été installées, la plus amont, immédiatement à l'aval du rideau d'injection et la plus aval, immédiatement à l'aval du rideau de drainage (profils E et F).

3.5.2. Drainage

Les écoulements recueillis derrière la membrane sont mesurés à la sortie de 4 collecteurs débouchant dans la nouvelle chambre des vannes.

4. Résultats

L'amélioration des conditions piézométriques est très nette. Dans le corps de l'ouvrage, l'efficacité de l'étanchéité par membrane est totale. En fondation, les sous-pressions sont également réduites et satisfont globalement les critères de projet. Sur l'appui rive droite du barrage de LA RIVE, il subsiste localement des sous-pressions avoisinant les 40% du niveau amont. Ces sous-pressions sont liées une fracturation du massif rocheux défavorable au drainage naturel.

L'évolution des débits de drainage de membrane est un phénomène caractéristique. A la première montée du plan d'eau, les débits de drainage de la membrane augmentent rapidement puis s'inversent brutalement pour décroître ensuite de façon régulière et continue. Dans le cas de LA RIVE, le débit de drainage a atteint une valeur élevée, alors que le débit permanent est stabilisé à une valeur moyenne inférieure à 0,5 l/s. Ce phénomène a été observé à l'identique sur le barrage de CHARTRAIN. Ces débits parasites ont pour origine des contournements localisés de la plinthe périmétrale. L'évolution favorable de ces débits est sans doute liée à la variation de perméabilité en surface du massif de fondation de la plinthe périmétrale.

Le débit total collecté (membrane et drains) à retenue pleine au travers de l'ouvrage et de sa fondation sont faibles, de l'ordre de quelques litres par secondes (environ 2 l/s pour LA RIVE).

La solution d'étanchement par géomembrane donne entièrement satisfaction. Le barrage de LA RIVE, après plus de 130 ans de service, est à nouveau en mesure d'assurer la sécurité de l'alimentation en eau de la Ville de Saint-Chamond.

Achever d'imprimer au Cemagref
Juin 2002

CEMAGREF
DOCUMENTATION
CLERMONT-FERRAND

Une trentaine d'années après les premières utilisations des géosynthétiques dans les barrages en France et 6 ans après un premier colloque commun, les communications présentées ici font l'objet du deuxième colloque organisé par le Comité Français des Géosynthétiques (CFG) et le Comité Français des Grands Barrages (CFGB). Ces communications confirment que les géosynthétiques constituent de plus en plus des solutions à part entière techniquement et économiquement intéressantes et non plus de simples variantes aux solutions plus anciennes. Les thèmes abordés sont :

- les évolutions récentes de la normalisation avec, en particulier, la présentation des normes d'application ;
- les derniers développements de la certification dans le domaine des géomembranes, qui fait suite à celle des géotextiles ;
- les contrôles durant le chantier et en service ;
- la question de la durabilité à partir de retours d'expérience, tant pour les géotextiles que les géomembranes ;
- la présentation en détail de trois barrages réhabilités récemment par géomembrane.

Comme pour toutes les techniques, il convient cependant de ne pas oublier que la fiabilité des solutions géosynthétiques nécessite qu'elles soient bien conçues, bien réalisées et bien contrôlées.



Cemagref Éditions 2002
ISBN 2-85362-600-8



9 782853 626002

Prix : 19,00 € TTC