

Réhabilitation de l'étanchéité de canaux navigables par géomembranes

Virginie Flaquet-Lacoux^a, Marie Malascrabes^a, Daniel Poulain^b, Hugues Girard^b et Michel Lino^c

Les voies navigables sont depuis quelques siècles un moyen de transport très utilisé en France (photo 1). La majeure partie du réseau actuel a été conçue à la fin du XIX^e siècle selon le même gabarit Freycinet garantissant la fréquentation des itinéraires par des péniches de 38,5 × 5,05 m avec un enfoncement maximum de 2,20 m. Quelques ouvrages aux dimensions plus importantes mieux adaptées à un trafic plus lourd et plus intense ont vu le jour après la seconde guerre mondiale, mais ils ne représentent qu'une faible proportion du réseau ; des projets de ce type sont également envisagés. Les digues des canaux ont toujours été réalisées à partir de matériaux du site plus ou moins sélectionnés ; elles manifestent aujourd'hui certains signes de vétusté, en particulier fuites, ruptures et phénomènes d'érosion.

Les services chargés de l'exploitation de ces voies navigables relativement anciennes sont donc impliqués dans des opérations de réparation et de confortement de canaux.

Différents cas de réhabilitation par géomembrane sont analysés dans la communication ; dans tous les cas présentés, les travaux font suite à la constatation de fuites sur le talus extérieur des digues, à leur pied ou à quelque distance de celui-ci. Ces fuites provoquent, outre une augmentation des besoins en eau, des risques d'instabilité interne (érosion régressive) et globale (glissement).

Dans la majeure partie des cas, le canal était muni d'un revêtement en béton ancien qui ne

remplissait plus son rôle et avait fait l'objet d'injections et/ou de mise en œuvre de palplanches sans succès durable.

Le Centre d'études maritimes et fluviales (CETMEF), avec l'appui du Cemagref, a entrepris un programme d'étude et de recherche sur la réalisation d'étanchéité de canaux par géosynthétiques afin de proposer un cadre tant pour la réhabilitation d'ouvrages existants que pour des travaux neufs. La présente communication synthétise un bilan de retours d'expérience et expose les résultats des études générales réalisées. Un cas de réhabilitation, présenté plus en détail par le bureau ISL (exemple du port de Marseille-les-Aubigny), permet d'approfondir le point de vue d'un maître d'œuvre.

Retour d'expérience

Exemples de réhabilitations

Les réhabilitations de 7 tronçons de canaux étanchés avant 1999 par un géosynthétique dans le Nord et l'Est de la France ont été examinées lors de l'étude générale précitée ; les principales caractéristiques des dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG) mis en œuvre dans ces travaux sont regroupées dans le tableau 1. Les enseignements recueillis, présentés en détail par Fagon *et al.* (1999), sont résumés ci-après. Les travaux sur ces 7 canaux ont été réalisés entre 1989 et 1998 ; ils ont concerné une surface cumulée d'environ 20 000 m². Les pentes des talus variaient

Les contacts

a. Cetmef, Dofni, 2, boulevard Gambetta, BP 60039, 60321 Compiègne Cedex
b. Cemagref, Bordeaux, UR Réseaux, Épuration et qualité des eaux, 50, avenue de Verdun, 33612 Cestas Cedex
c. ISL, Bureau d'Ingénieurs Conseils, 75 boulevard Mac-Donald, 75019 Paris

► Photo 1 – Canal du Nord.



de 1/2,5 (1 V/2,5 H) à 1/1,75. Pour assurer l'étanchéité, 2 types de géomembranes bitumineuses (chacune sur 3 sites, de 3 à 4 mm d'épaisseur) et un géosynthétique bentonitique (5 kg/m²) ont été utilisés.

L'ensemble des 7 tronçons réhabilités donnait satisfaction en 1998 aux utilisateurs, avec disparition des fuites. Un nouvel état des lieux réalisé en 2004, à l'occasion de cette communication, auprès des subdivisions concernées de VNF montre (tableau 2) que des fuites sont apparues dans 3 cas mais les utilisateurs ne les attribuent pas *a priori* aux DEG. Dans le cas du

bief 34 (canal de la Marne au Rhin), le phénomène décrit concernerait l'instabilité du *substratum* soumis à des écoulements souterrains extérieurs au canal ; cet exemple illustre le fait que la géomembrane n'a pas de rôle mécanique et nécessite une structure support suffisamment stable et résistante.

Parallèlement à l'état des lieux sur les travaux plus anciens présentés ci-dessus, des réhabilitations plus récentes ont été répertoriées ; leurs caractéristiques font l'objet du tableau 2 et on peut noter qu'elles sont similaires aux premières réhabilitations. La mise en œuvre du DEG a également permis de supprimer les fuites importantes constatées. Les phénomènes d'érosion souterraine cités pour 3 cas impliquent la stabilité du *substratum* et il est important de rappeler que, dans ces cas, la durabilité de la réhabilitation repose sur un traitement efficace du *substratum* comme illustré par l'exemple de Marseilles-les-Aubigny présenté ci-après.

Exemple du port de Marseilles-les-Aubigny

Le port de Marseilles-les-Aubigny est situé à la jonction du canal latéral de la Loire et de l'ancien

▼ Tableau 1
– Chantiers réalisés avant 1999.

Localisation	Date des travaux Durée	Type géosynthétique	Situation canal Fruit des talus Zone étanchée	Support	Protection	Problèmes constatés (avant travaux)	Etat 1998 Etat 2004
Canal de Roanne à Digoin PK 20.840 – 21.020	1989 2 mois	Bitumineuse (ép. = 3mm)	Remblai 5/2 Cuvette (180ml)	démolition ancien couvage béton tt venant 0/100 mm	dalles béton coulées en place (ép. = 15 cm)	fuites, suintements renards	comportement satisfaisant, absence de fuites Idem
Canal de la Marne au Rhin Bief 11	1992 0.5 mois	Géosynthétique bentonitique (ép. = 8mm – 5kg/m ²)	Mixte 3.5/2 talus seul (100ml – 750m ²)	matériaux digue existante après curage vase et reprofilage par couche de grave si nécessaire	couche de grave (ép. = 10cm) tt venant (ép. = 30cm) + plaques béton evergreen (batillage)	fuites	comportement satisfaisant, absence de fuites Idem
Canal des houillères de la Sarre à Wittring Bief 22	1994 1 mois	Bitumineuse (ép. = 3mm)	remblai 3/2 talus seul (100ml – 750m ²)	démolition ancien revêtement en béton géotextile (210g/m ²) grave émulsion (ép. = 15cm)	dalles béton coulées en place (épaisseur = 15 cm)	fuites	disparition des fuites comportement satisfaisant exceptée une fuite mais le DEG ne serait <i>a priori</i> pas en cause (étanchement du talus seulement).
Canal de la Marne au Rhin Bief 34	1994 1 mois	Bitumineuse (ép. = 4mm)	mixte 3/2 cuvette (4400 m ²)	démolition béton existant géotextile grave émulsion (ép. = 15 cm)	dalles béton coulées en place (ép. = 15 cm)	fuites entraînant des désordres dans la voie ferrée voisine travaux injection et palplanches sans succès durable	écoulements réduits dans le fossé de pied apparition de fuites importantes et vortex (tourbillon) dans le canal. Bief vidé : galerie dans la digue, "trou" dans la géomembrane, et dalles béton dégradées. Comblement de la galerie et de la zone sensible par 35 m ³ de béton. Actuellement toujours petites fuites
Canal du Nord Biefs3/4 5/6	1992 3 sem. / intervient.	Bitumineuse (ép. = 3mm)	remblai 3/2 talus seul (8000m ²)	démolition béton existant grave laitier (ép. = 15cm) géotextile (500g/m ²)	géotextile (300g/m ²) dalles béton (ép. = 15cm) coulées en place	fuites	comportement satisfaisant, absence de fuites Idem
Canal de la Marne au Rhin - Bief 40	1998 1 mois	Bitumineuse (ép. = 4mm)	remblai 3/2 cuvette (3100m ²)	revêtement béton existant ou grave roulée (ép. = 15 cm) sur zone non revêtue géotextile	dalles béton (ép. = 15 cm) coulées en place	fuites importantes travaux d'injection sans succès durable	disparition des fuites après travaux apparition d'une nouvelle fuite dans la même zone. Bief vidé, le DEG ne serait pas en cause, un traitement par injections est préconisé.
Canal des Houillères de la Sarre Biefs 10 et 23	1998 1.5 mois	Bitumineuse (ép. = 4 mm)	remblai 3/2 cuvette (1100m ²)	concassé calcaire (ép. = 15 cm) géotextile	dalles béton (ép. = 15 cm) coulées en place	infiltrations au niveau de 2 ouvrages (aqueducs)	disparition des infiltrations après travaux Bief 10 : Comportement satisfaisant ; Bief 23 : Etanchéité réalisée sur 30 m : observation de fuites par contournement de la géomembrane. Battage de palplanches de part et d'autre de la partie étanchée.

canal du Berry à l'écluse n° 25. Il est implanté sur une terrasse alluviale de la Loire. Une partie de la commune est située en contrebas du port. Le port est constitué d'une cuvette bétonnée de 550 m de long, de 45 m de largeur moyenne et de 2,65 m de profondeur. Le profil est mixte : déblai côté berge et remblai côté Loire. La géologie du site se caractérise par la présence de sables argileux surmontant une assise de calcaire marneux de l'oxfordien (jurassique supérieur) connu comme karstique. La digue a été élevée en remblai de sables argileux, graveleux par endroits, provenant directement des matériaux déblayés de la cuvette.

La construction du port fluvial de Marseilles-les-Aubigny remonte à la première moitié du XIX^e siècle. Ce port présente depuis sa mise en service des anomalies de comportement en liaison avec les écoulements souterrains et des fuites dans sa cuvette. Les désordres constatés (désordres dans le revêtement, développement de fontis sur les 2 rives, inondations de caves à proximité) sont reliés de façon principale au contexte géologique et hydrogéologique du site (circulations karstiques

dans les calcaires). Ce diagnostic a été confirmé par l'étude détaillée de l'ouvrage conduite en 1998 par ISL (Cetmef, 2002) et par l'examen de la cuvette lors de la mise hors d'eau pour la réalisation des travaux en 1999. Le fond de la cuvette a été trouvé dans un état de dégradation avancée et on a recensé une dizaine d'effondrements en fond de cuvette.

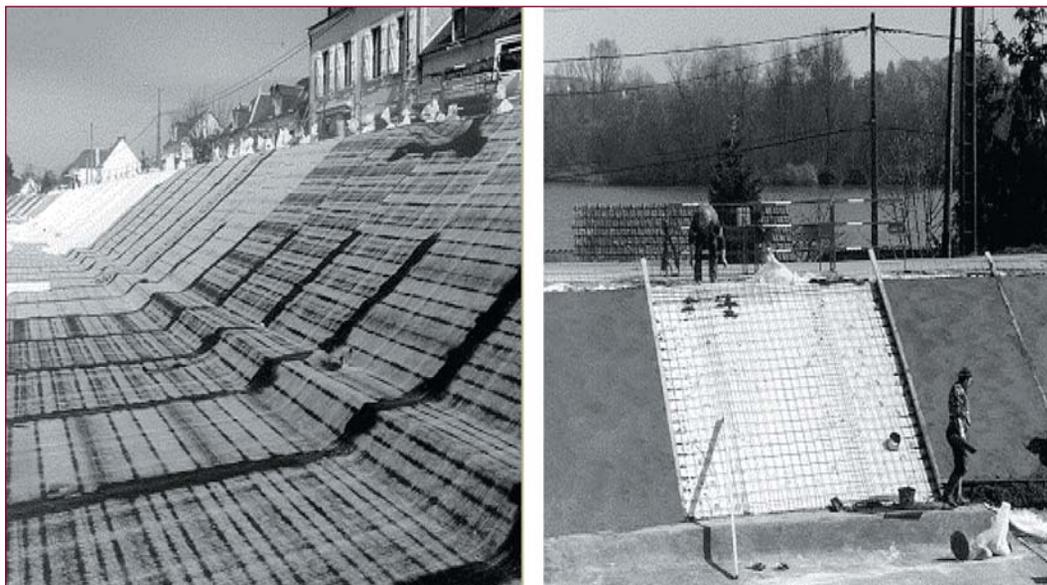
Les travaux d'étanchement de la cuvette de Marseilles-les-Aubigny ont comporté les éléments suivants :

- vidange du port et extraction des boues de la zone de la cuvette à traiter ;
- détection des cavités ou zones de faible compacité par imagerie électrique ;
- traitement de la fondation par injection solide ;
- comblement au gros béton des parties affaissées ou détruites de la dalle de fond de cuvette et ragréage soignée de cette dalle ;

▼ Tableau 2
– Chantiers réalisés depuis 1999.

Localisation	Date des travaux Durée	Type géosynthétique	Situation canal • Fruit des talus • Zone étanchée	Support	Protection	Problèmes constatés (avant travaux)	Etat 2004
Canal du nivernais Bief de Coulanges (la côte aux merles)	• 2000 • 2 mois	Bitumineuse (ép. 3mm)	• mixte • 3/2 • 8600 + 3500m ²	• Porphyre concassé (ép. 20cm) • Géotextile 300g	• Géotextile 300g/m ² • Enrochements (D150) bétonnés • Dalle béton armé en plafond	• Fuites • Baisse flagrante des niveaux	Disparition des fuites
Canal du nivernais Bief de la petite corvée (n°19)	• 2002 • 2 mois	Bitumineuse (ép. 3mm)	• mixte • 3/2 • 3500 + 8100m ²	• Porphyre concassé (ép. 20cm) • Géotextile 300g/m ²	• Géotextile 300g • Dalle en béton fibré (polypropylène) coulée en place (ép.min 8cm)	• Fuites	Disparition des fuites
Canal Latéral à la Loire Bief du guétin : Le crot de savigny	• 2001 • 1 mois	Bitumineuse (ép. 3mm)	• mixte • 3/2 • 3100m ²	• Porphyre concassé(ép. 20cm) • Géotextile 300g/m ²	• Géotextile 300g/m ² • Dalle en béton fibré (polypropylène) coulée en place (ép.min 8cm)	• Étude géotechnique, géophysique • Fuites • renard	Disparition des fuites
Canal Latéral à la Loire Bief du guétin : Le Marais + Crésancy	• 2002 • 1,5 + 1 mois	Bitumineuse (ép. 3mm)	• mixte • 3/2 • 7400 + 2100m ²	• ancienne cuvette en béton • Géotextile 300g/m ²	• Géotextile 300g • Dalle en béton fibré (polypropylène) coulée en place (ép.min 8cm)	• Fontis sur terrains en contrebas	Disparition des fuites
Canal du Nord Bief 6/7	• 2003 • 1 mois	Bitumineuse (ép. 3mm)	• remblai • 3/2 • talus seul (1500 m ²)	• démolition béton existant • Grave laitier (ép. = 15cm) • Géotextile (500g/m ²)	• Géotextile (300g/m ²) • dalles béton (ép. = 15cm) coulées en place	• Fuites	Comportement satisfaisant, disparition des fuites dans les zones traitées. <u>Observations</u> : rupture d'une digue en janvier 2003 à un endroit où des fuites avaient été détectées et où la pose d'un DEG était programmée pour avril 2003.
Canal Latéral à la Loire Bief de Chatillon sur Loire : Beaulieu + Port de chatillon	• 2003 • 2 mois	Bitumineuse (ép. 3mm)	• mixte • 3/2 (plus raide par tronçons) • 15000m ²	• ancienne cuvette en perré maçonné • Géotextile 300g/m ²	• Géotextile 300g • Dalle en béton fibré (polypropylène) coulée en place (ép.min 8cm)	• Fuites • Résurgences • Étude de diagnostic • Forts enjeux	Disparition des fuites
Canal du centre Rigole de l'Arroux	• 2004	PEHD (1,5 mm)	• remblai • cuvette : 3/2 • talus progressifs verticaux jusqu'à la jonction du pont-canal • 2 400 m ²	Selon section : • béton existant • remblai 0/50 • couche drainante 10/20 • mur BA déversoir • géotextile	• géotextile • béton 10cm	• brèche • fuites • affouillements	

► Photos 2 et 3
– Mise en place de la géomembrane et du géotextile et coulage des dalles de protection du talus de la digue Est.



– mise en place d'un DEG (photos 2 et 3) sur une superficie de 10 000 m² : la géomembrane utilisée est une membrane bitumineuse armée, de 4 mm d'épaisseur, revêtue sur sa face supérieure par un géotextile et protégée au moyen d'une dalle en béton armée par un treillis soudé (épaisseur 8 cm mini en radier et 12 cm mini en talus). Après l'examen de ces retours d'expérience, la deuxième partie de l'article est consacrée aux études générales réalisées.

Choix du type de protection

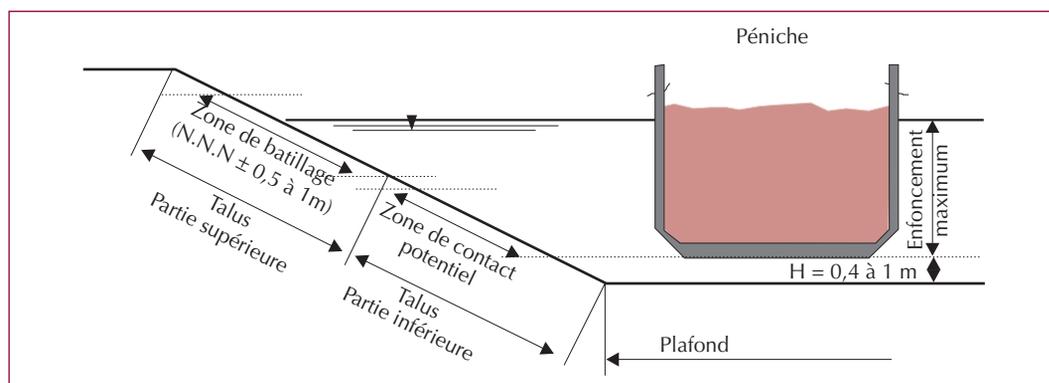
Afin de définir les principaux types de protections techniquement utilisables dans les voies navigables, il est nécessaire de découper le profil en travers du canal **en zones homogènes vis-à-vis des sollicitations**. Sur la figure 1 sont mises en évidence les 3 zones de sollicitations spécifiques

du DEG : le plafond du canal, la partie inférieure du talus, caractérisée principalement par la possibilité de contact (ou choc) avec les bateaux et la partie supérieure du talus, soumise à l'action des vagues.

Le fond du canal est soumis à des sollicitations usuelles telles que les jets d'hélices et à des sollicitations accidentelles : chutes d'objets, contact accidentel avec une partie du bateau (hélice, ancre...), effets accentués au niveau des ouvrages (écluses, ancrage...) et actions éventuelles de curage. Dans cette zone, le courant est faible en section ordinaire et il y a donc peu de problèmes d'érosion. Dans le cas d'une réhabilitation, il faut veiller à ce que la profondeur nominale soit garantie.

La partie inférieure du talus correspond à la zone de contact éventuel avec les bateaux. Cette zone

► Figure 1 – Zones de sollicitations spécifiques dans un canal.



est toujours sous l'eau et la vitesse du courant y est généralement faible, en dehors des sections proches des ouvrages. Par contre, la stabilité du DEG et de sa couche de protection doit être examinée.

La partie supérieure du talus est la zone soumise à l'action des vagues dues au vent et au passage des bateaux. Elle est en majeure partie au-dessus du niveau normal des eaux et donc soumise aux agressions atmosphériques (UV, gel, glace...); la protection contre le vandalisme et l'aspect esthétique devront également être pris en compte, l'intégration des canaux dans le paysage étant à juste titre une préoccupation importante des projeteurs. Enfin, la stabilité du DEG devra être assurée.

En fonction des sollicitations précédemment décrites, les principaux types de **structures de protection envisageables** dans le cas des canaux navigables sont données dans le tableau 3. Ce tableau indique également le degré d'adéquation de ces structures aux 3 zones retenues.

Généralement, un géotextile antipoinçonnant est disposé entre la géomembrane et les structures de protection qui sont décrites ci-après.

Dans le cas des protections en béton, il s'agit généralement d'un béton armé d'un treillis soudé ou « fibré ».

Les graves traitées sont des matériaux graveleux avec addition de liant (bitume, ciment) et compactés; la cohésion apportée par le liant permet, par rapport aux graves non traitées, de limiter l'épaisseur à mettre en œuvre et surtout de diminuer les problèmes éventuels d'érosion. En partie haute des talus, ce type de matériau doit avoir une très bonne résistance à l'érosion et aux sollicitations climatiques.

La dénomination « graves et enrochements » (STCPMVN, 1995) regroupe des matériaux sans liant, de granulométries diverses : graves avec fines jusqu'à enrochements proprement dits. Une attention particulière sera apportée à proximité des ouvrages (écluses et points d'amarrage) où les manœuvres accentuent l'érosion due au jet d'hélice.

Les éléments suspendus regroupent des systèmes mettant généralement en œuvre des géosynthétiques et nécessitant un ancrage en tête lorsqu'ils sont utilisés sur talus (éléments alvéolaires, géo-conteneurs, gabions, éléments béton préfabriqués...); leur résistance à l'érosion sous l'effet des vagues est à examiner avec soin (CFG, 2004).

▼ Tableau 3 – Principales structures de protection répondant techniquement aux sollicitations spécifiques des canaux navigables.

Type de protection	Plafond	Bas du talus	Haut du talus
Béton	***	***	***
Grave traitée	***	***	*
Grave/enrochement	***	***	***
Éléments suspendus			
- éléments alvéolaires	-	***	*** (1)
- géo-conteneurs	-	***	*** (1)
- gabions	-	***	*** (1)
- éléments liaisonnés	-	*	*** (1)

(1) : sous réserve de la bonne tenue à l'érosion du produit utilisé.

*** : convient dans le cas général.

* : convient éventuellement.

- : non utilisé en général.

On trouvera dans la publication de Flaquet-Lacoux *et al.* (2004b) une proposition de méthodologie pour le choix d'une structure de protection en fonction des sollicitations propres à chaque zone et des caractéristiques des matériaux disponibles décrites ci-dessus.

Stabilité sur pente de la protection

Principes de calcul

Nous nous intéressons ici uniquement à la stabilité des couches ou structures de protection des géosynthétiques; seul le risque de glissement plan le long du complexe géosynthétique est pris en compte. Parallèlement, le projeteur devra s'assurer de la stabilité interne des sols de protection mis en place sur la pente de part et d'autre du complexe géosynthétique ainsi que de la stabilité globale du talus.

Nous ne présentons pas ici en détail les méthodes de calcul préconisées, seuls les principes généraux sont donnés ainsi que les références des documents détaillant ces méthodes. Notons que la caractérisation des interfaces géosynthétiques est un préliminaire important pour définir les paramètres de calcul; dans le cas présent, les contraintes appliquées aux interfaces impliquant au moins un géosynthétique sont relativement faibles (inférieures à quelques dizaines de kPa); dans ces conditions, la caractérisation des

interfaces et notamment la mesure des angles de frottement δ sera réalisée de préférence avec un appareillage de type plan incliné permettant des essais sous faible contrainte normale.

Dans le cas où il n'y a **pas de butée de pied**, l'analyse de stabilité correspond simplement en un équilibre des forces motrices, dues au poids propre de la protection et des forces stabilisatrices constituées par la force de frottement mobilisable sur l'interface étudiée à laquelle s'ajoute une force d'ancrage éventuelle en tête de talus. Les sous-pressions éventuelles à l'interface géosynthétique doivent être prises en compte en cas de saturation de tout ou partie de la (des) couche(s) de protection.

Dans le cas général de **la présence d'une butée de pied**, l'approche classique de la stabilité est réalisée également par un calcul à la rupture, il est alors basé sur la division de la couche de protection en deux blocs : un bloc actif constitué par la couche de protection sur la pente et un bloc passif constitué par la butée de pied. De telles méthodes sont proposées, en particulier, par Soong et Koerner (1996) et par Giroud (1995) et ont été développées et appliquées aux caractéristiques spécifiques des canaux par Poulain *et al.* (2000). La principale difficulté est alors la prise en compte des conditions hydrauliques.

Étude expérimentale de la capacité d'ancrage en tête de talus par recouvrement et tranchée

Lorsque le dispositif d'étanchéité par géomembrane n'est pas auto-stable par simple frottement sur la pente, il est nécessaire d'ancrer le géotextile supérieur afin d'éviter tout glissement et de reprendre les tensions induites par les sols de couverture reposant sur le complexe géosynthétique, ce qui permet d'éviter les contraintes dans la géomembrane. Cet ancrage peut prendre différentes formes (recouvrement simple ou

tranchées de géométries diverses) en fonction des contraintes spatiales de l'ouvrage. Notre synthèse bibliographique dans ce domaine a fait apparaître essentiellement trois méthodes de calcul pouvant donner des résultats très différents pour une même configuration de tranchée. À partir de ce constat, il nous est apparu nécessaire de concevoir un appareillage expérimental spécifique : un banc d'ancrage permettant de modéliser en vraie grandeur des tranchées d'ancrage afin de comparer les méthodes de calcul et analyser les mécanismes de l'ancrage. Cette étude expérimentale a été présentée en détail par Briançon *et al.* (2003).

Si des développements complémentaires restent nécessaires pour mieux prendre en compte le cas des sols cohérents, nos résultats permettent de proposer, dans le cas le plus fréquent des sols pulvérulents, de prendre en compte uniquement le frottement aux interfaces des géosynthétiques (Hulling et Sansone, 1997) pour calculer les dimensions d'une tranchée d'ancrage.

Expérimentation *in situ* d'un DEG sur une berge de canal navigable

L'objectif de cette expérimentation, décrite en détail par Flaquet-Lacoux *et al.* (2004a), est de valider en vraie grandeur, dans le cas des canaux navigables, les résultats des études techniques et théoriques sur la stabilité des DEG sur pentes présentées précédemment ; il s'agit en particulier de vérifier la validité des hypothèses adoptées pour la prise en compte des conditions hydrauliques : remplissage, vidange et effets des vagues considérées comme une vidange très rapide du canal. Les caractéristiques principales des matériaux de protection retenus sont regroupées dans le tableau 4. L'expérimentation a été mise en œuvre sur le Canal du Nord, les 5 et 6 novembre 2002. Ce canal est étanché par des dalles en béton. Les DEG testés ont été mis en œuvre sur ces dalles (photo 4). Chaque planche

► Tableau 4
– Caractéristiques principales des matériaux de protection.

N° planche	1	2	3
Protection	M1 : Gabions	M2 : Béton/GSY-R	M3 : Béton/Câbles
Fournisseur	France-Gabion	VDB Beton	Cimage
Référence	Matelas Reno	Betomat PE-VB 9	Dycel 101
Épaisseur	16 cm	9 cm	10 cm
Poids	250 kg/m ²	180 kg/m ²	215 kg/m ²

d'essai correspond à un DEG constitué d'une géomembrane bitumineuse (posée sur la dalle béton existante, avec sa face lisse vers le haut), d'un géotextile de protection et du matériau de protection considéré.

Les mesures effectuées (pressions d'eau sur et sous la protection ainsi que les forces de retenue) permettent de valider les calculs théoriques de stabilité des DEG mis en œuvre. Les premiers résultats de l'expérimentation apportent dès maintenant des informations utiles aux calculs de stabilité de ces protections sur pente. Parallèlement, l'observation des planches expérimentales lors de la vidange du canal, 5 mois après leur mise en œuvre, a montré un bon comportement des protections testées, en particulier sans déplacements ni endommagement.

Développement d'un logiciel de calcul

Sur la base des méthodes de calcul et des études présentées précédemment, le logiciel G-SCAP a été développé ; il facilite les calculs simples mais fastidieux notamment en présence de plusieurs couches de protection et de conditions hydrauliques complexes (Poulain *et al.*, 2004). Grâce à ses 2 modules, ce logiciel permet de déterminer l'effort à reprendre pour assurer la stabilité de la protection sur la pente et de dimensionner la tranchée d'ancrage nécessaire en tête de talus pour équilibrer cet effort. Ce logiciel permet d'abord tout particulièrement la stabilité de nombreux dispositifs de protection des géomembranes dans les ouvrages hydrauliques et en couverture de centres de stockage de déchets.

Conclusion

Les retours d'expérience de réhabilitation par géomembrane de l'étanchéité de canaux navigables en France répertoriés et analysés ici montrent



◀ Photo 4 – Mise en place d'un élément de pavés béton.

que les résultats obtenus sont satisfaisants ; les gestionnaires des canaux concernés sont disposés, pour un problème d'étanchéité similaire, à reconduire le même dispositif. Toutefois, il faut veiller à s'assurer de la stabilité des talus et du *substratum*, la géomembrane n'ayant pas de rôle mécanique.

S'appuyant en partie sur ces réalisations, une étude théorique et méthodologique a été menée sur l'utilisation des dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG) dans les canaux navigables ; cette étude a été validée pour certains DEG par une expérimentation sur site en vraie grandeur. Ses résultats permettent de proposer :

- une démarche pour le choix de la structure de protection en fonction des critères techniques, économiques et environnementaux propres aux canaux navigables ;
- des méthodes de calculs à la rupture permettant de prendre en compte les conditions hydrauliques variées rencontrées dans les canaux et déterminer la stabilité des différentes structures de protection de la géomembrane. □

Remerciements

Nous tenons à remercier d'une part VNF (Voies navigables de France) pour son soutien et la participation de ses différentes subdivisions concernées (tout particulièrement celle de Cambrai pour l'expérimentation sur le canal du Nord) et d'autre part les producteurs et les distributeurs (Bidim Geosynthetics, Cimage, France Gabion, Siplast Icopal, Van den Broucke) qui ont apporté leur concours pour les études présentées et leur propre expérience dans le domaine.

Résumé

Une série d'études réalisées depuis 1996 sur l'utilisation des géomembranes pour la réhabilitation de l'étanchéité des canaux navigables est présentée. Ces études concernent des retours d'expérience (analyse de 14 réalisations en France), la stabilité sur pentes des dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG) pour 3 types de canaux (Freycinet, gabarits moyen et grand), les aspects technico-économiques pour différents DEG envisageables, la réalisation d'une expérimentation et le dimensionnement des ancrages en tête de talus. Une réalisation est présentée plus en détail.

Ces études ont mis en évidence sur le profil d'un canal trois zones de sollicitations : le plafond, la partie inférieure du talus et la partie supérieure, et les différentes actions de l'eau spécifiques aux canaux de navigation ont été examinées. Elles ont permis d'analyser au niveau technique et économique les principaux dispositifs courants de protection de la géomembrane actuellement possibles (dalles en béton, grave traitée, grave et enrochements, éléments suspendus) et de proposer un organigramme de choix. La solution « géomembrane » est également comparée aux solutions plus anciennes (injections, palplanches, argile...).

Abstract

A serie of studies conducted since 1996 on the use of geomembranes to rehabilitate the watertightness of navigable canals is presented. These studies concern feedback on experience (analysis of 14 projects in France), the slope stability of Geomembrane Liner Systems (GLS) for 3 types of canals (Freycinet, medium and large canals), the technical and economic aspects of different GLS that can be considered, the carrying out of an experiment and the calculation of the dimensions of anchorage at the top of the slope. One project is presented in more detail.

These studies highlight three zones of the canal profile and their specific stresses : the bottom, the lower part of the slope and the upper part, and the different actions of water that are specific to navigation canals are examined. They also enable us to make a technical and economic analysis of the main systems that are currently possible to protect the geomembrane (concrete slabs, treated gravel, gravel and rock and suspended systems) and to propose a decision-making flowchart to guide the choice of system. The "geomembrane" solution is also compared with older solutions (grouting, sheet piles, clay...).

Bibliographie

- BRIANCON, L., GIRARD, H., POULAIN, D., 2002, Slope Stability of Geomembrane Lining Systems, Experimental Modeling of Friction at Geosynthetic Interfaces, *Geotextiles and geomembranes*, vol. 20, n° 3, p. 147-172.
- BRIANCON, L., GIRARD, H., POULAIN, D., ARTIÈRES, O., POTIÉ, G., GRISARD, A., 2002, Influence of hydraulic conditions on the stability of geosynthetic systems on slopes, *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, 22-27 September 2002, Balkema publishers, p. 655-658.
- BRIANÇON, L., GIRARD, H., POULAIN, D., CHAREYRE, B., 2003, Dimensionnement des tranchées d'ancrage en tête de talus des dispositifs d'étanchéité par géomembrane, *Revue Française de Géotechnique*, n° 103, p. 13-24.
- Cetmef (Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales), 2000, *Ouvrages de Navigation et écoulements souterrains-Phénomènes, surveillance, prévention et réparation*, 144 p.
- CFG, Comité Français des Géosynthétiques, 2004, *Fascicule de recommandations : Utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion*, Site Internet : www.cfg.asso.fr.
- FAGON, Y., FLAQUET-LACOUX, V., GIRARD, H., POULAIN, D., 1999, Bilan de 10 ans d'utilisation de dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques dans les canaux navigables français, *4^{es} Rencontres Géosynthétiques*, Comité français des Géosynthétiques, Bordeaux, p. 187-192.
- FLAQUET-LACOUX, V., FISCHER, S., GIRARD, H., POULAIN, D., 2004, Geomembrane liner systems on slopes in navigable canals : on-site experimental stability study, *Proceedings of the Third European Geosynthetics Conference*, Eurogeo3, Munich, p. 221-226.
- FLAQUET-LACOUX, V., MALASCRAVES, M., GIRARD, H., POULAIN, D., LINO, M., 2004, Réhabilitation de l'étanchéité de canaux navigables par géomembranes, Colloque « Sécurité des digues fluviales et de navigation », CFGB-MEDD, Orléans, France, 25-26 novembre 2004, p. 505-530.
- GIROUD, J.-P., BACHUS, R.-C., BONAPARTE, R., 1995, Influence of water flow on the stability of geosynthetic soil layered systems on slopes, *Geosynthetics International*, vol. 2, n° 6, p. 1149-1180.
- HULLING, D.E., SANSONE, L.J., 1997, Design concerns and performance of geomembrane anchor trenches, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 15, p. 403-417.
- KOERNER, R.M., 1998, *Designing with geosynthetics*, Prentice Hall, 761 p., 4th ed.
- POULAIN, D., GIRARD, H., BRIANCON, L., FAGON, Y., FLAQUET-LACOUX, V., 2000, Geosynthetic lining system in French navigable canals : design of the protective layer, *proceedings of the 2nd European geosynthetics conference*, Eurogeo 2000, Bologna, Italy, October 15-18, Pàtron editore, Bologna, vol. 2, p. 695-700.
- POULAIN, D., GIRARD, H., GLAUD, HADDANE, K., 2004, Stability and anchorage Of geosynthetic systems on slopes : development of a new designing tool, *Proceedings of The Third European Geosynthetics Conference*, Eurogeo3, Munich, p. 389-392.
- Setra, LCPC, 2000, *Étanchéité par géomembrane des ouvrages pour les eaux de ruissellement routier*, guide technique, 92 p. + guide complémentaire.
- SOONG, T.E., KOERNER, R.M., 1996, Seepage induced slope instability, *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 14, p. 425-445.
- STCPMVN, Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables, 1995, *Catalogue de défense des berges*, 50 p.

Photo : Patrice Mériaux (Cemagref)

