

Réhabilitation de l'étanchéité de canaux par géomembranes

Mathieu Galiana ^a, Virginie Flaquet-Lacoux ^a, Hugues Girard ^b et Daniel Poulain ^b

Les voies navigables sont depuis quelques siècles un moyen de transport très utilisé en France. La majeure partie du réseau actuel a été conçue à la fin du siècle dernier selon le même gabarit Freycinet garantissant la fréquentation des itinéraires par des péniches de 38,5 x 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. 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. Les techniques traditionnelles de confortement consistent à réaliser un écran d'étanchéité vertical dans le corps de la digue du canal (rideau de palplanches ou rideau d'injection) ou à mettre en œuvre un revêtement étanche de surface (béton de ciment ou béton bitumineux). Depuis une quinzaine d'années, l'utilisation de dispositifs d'étanchéité par géomembranes ou produits apparentés apparaît, en complément des méthodes précitées.

Différents cas de réhabilitation par géomembrane sont analysés dans cet article ; 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.

Cet article constitue une actualisation et une synthèse d'un document du Centre d'études techniques maritimes et fluviales (Cetmef) et du Cemagref sur la réhabilitation de l'étanchéité de canaux navigables par géomembranes (Flaquet-Lacoux *et al.*, 2004). Il réunit des bilans de retours d'expérience, en présentant notamment un exemple détaillé de réhabilitation, et il expose les résultats de l'expérimentation d'un dispositif d'étanchéité par géomembranes (DEG) sur une berge de canal.

Retour d'expérience

Tronçons étanchés avant 1999

Les réhabilitations de sept tronçons de canaux étanchés par un géosynthétique dans le Nord et l'Est de la France ont été examinées lors de l'étude générale précitée. Les travaux ont été réalisés entre 1989 et 1998 et ont concerné :

Les contacts

a. Centre d'études techniques maritimes et fluviales (Cetmef),
2 boulevard Gambetta,
BP 60039, 60321
Compiègne Cedex
b. Cemagref, UR
Réseaux, épuration
et qualité des eaux,
50 avenue de Verdun,
Gazinet, 33612 Cestas
Cedex

1. Voies navigables de France.

- le canal de Roanne à Digoin en 1989 ;
- le canal de la Marne au Rhin en 1992, 1994 et 1998 ;
- le canal du Nord en 1992 ;
- le Canal des Houillères de la Sarre en 1994 et 1998.

Les principales caractéristiques des DEG mis en œuvre dans ces travaux sont présentées par Flaquet-Lacoux *et al.* (2004). Nous résumons ci-après les enseignements recueillis.

Les travaux sur ces sept canaux ont été effectués sur une surface cumulée d'environ 20 000 m². Les pentes des talus variaient de 1/2,5 (1V/2,5H) à 1/1,75. Pour assurer l'étanchéité, deux types de géomembranes bitumineuses (chacune sur trois sites, de 3 à 4 mm d'épaisseur) et un géosynthétique bentonitique (5 kg/m²) ont été utilisés. Le choix du type de géomembrane est le résultat d'appels d'offres.

Dans le cas le plus fréquent d'un ancien revêtement en béton, celui-ci a dû le plus souvent être démolé (4 cas sur 5) compte tenu de son mauvais état ; dans le dernier cas, le béton a été conservé après comblement au mortier des trous et des fissures. Il a été constaté que la structure support retenue peut être très différente selon les conditions spécifiques du site ; elle comporte, à partir de sa base, tout ou partie des éléments suivants :

- un géotextile anti-contaminant (deux cas ; 210 et 500 g/m²),
- une couche de grave-traitée (épaisseur = 15 cm ; trois cas) ou une couche de grave (épaisseur = 15 à 30 cm ; deux cas),
- un géotextile anti-poinçonnant (dans un seul cas).

Pour les tronçons étanchés par géomembrane, la couche de protection est constituée par des dalles en béton de 15 cm d'épaisseur, coulées en place dans des coffrages. Dans un cas, un géotextile a été mis en place entre la géomembrane et le béton (300 g/m²). Un cas a été étanché par un géosynthétique bentonitique (GSB) ; le confinement et la protection du GSB ont été réalisés par une couche de grave (10 cm) et une couche de tout venant (30 cm) ; sa protection a été complétée en haut de talus par des éléments en béton préfabriqués.

Comme pour toute étanchéité par géomembrane, les raccordements aux ouvrages (écluses, quais...)

et parfois en haut de talus (palplanches, muret...) ont dû faire l'objet d'une conception au cas par cas et d'une réalisation soignées. Il est à noter que pour trois cas, l'étanchéité n'a concerné qu'une partie du canal (talus seul ou demi-canal), ceci quand les fuites ont pu être clairement localisées au niveau de la digue.

L'ensemble des sept tronçons réhabilités donnait satisfaction en 1998 aux utilisateurs, avec disparition des fuites. Un nouvel état des lieux auprès des subdivisions concernées de VNF¹, en 2004 (Flaquet-Lacoux *et al.*, 2004), puis en 2006 à l'occasion de cet article, montre que des fuites sont apparues dans trois 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.

Tronçons étanchés depuis 1999

Parallèlement à l'état des lieux sur les travaux plus anciens présentés ci-dessus, 7 réhabilitations plus récentes ont été répertoriées ; leurs caractéristiques détaillées sont présentées par Flaquet-Lacoux *et al.* (2004). Les travaux ont concerné les ouvrages suivants :

- le canal du Nivernais en 2000 et 2002 ;
- le canal latéral à la Loire en 2001, 2002 et 2003 ;
- le canal du Nord en 2003 ;
- le canal du Centre (rigole de l'Arroux) en 2004.

À noter que la réhabilitation la plus récente correspond à une rigole d'alimentation et non à une section courante de canal. Elle fera l'objet d'une présentation détaillée ci-après (*cf.* « Exemple de réhabilitation : la rigole de l'Arroux »). Les six autres cas permettent de formuler les commentaires généraux suivants :

- les réhabilitations donnent satisfaction à ce jour. Les phénomènes d'érosion cités pour six d'entre eux impliquent la stabilité du substratum et il est important de rappeler que, dans ces cas, la durabilité de la réhabilitation repose sur un traitement du substratum ;
- pour quatre cas, le support a été reconstitué (grave concassée non traitée, grave laitier) alors

que le revêtement existant a été conservé dans les deux autres cas. Un géotextile de 300 g/m² a ensuite été posé ;

– la géomembrane utilisée est une géomembrane bitumineuse dans tous les cas ;

– la couche de protection est généralement constituée par une couche en béton fibré coulée en place disposée sur un géotextile. Pour un cas, la géomembrane est protégée en talus par des enrochements enrobés de béton.

La mise en œuvre du DEG a permis de supprimer les fuites importantes constatées pour les 6 cas de réhabilitation de canaux recensés depuis 1999.

Exemple de réhabilitation : la rigole de l'Arroux

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE AVANT TRAVAUX

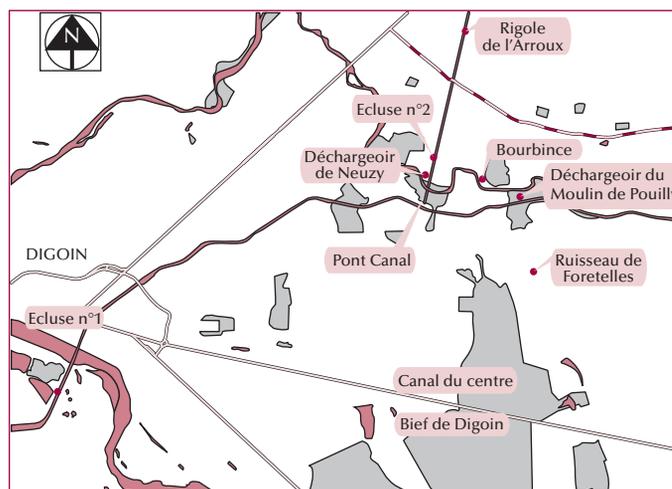
La rigole de l'Arroux relie l'Arroux depuis Gueugnon au canal du Centre à Digoin, bief 26 Océan-Écluse de Digoin, appelé bief de Digoin. Il s'agit d'un canal « berrichon »², navigué depuis son ouverture en 1877 jusqu'en 1957. Depuis cette date, ce canal n'est utilisé qu'au titre de l'alimentation en eau du canal du Centre, pour les besoins de la navigation.

Le dernier bief de la rigole de l'Arroux, qui franchit la Bourbince par un pont canal, est en communication directe avec le bief de Digoin (figure 1). Il s'étend entre l'écluse de Neuzy et le canal du Centre sur un linéaire de 433 m.

Le profil type de l'ouvrage est trapézoïdal, la largeur au plafond est de 3 m, la profondeur moyenne est de 1,50 m, la pente moyenne des talus est de 3/2. Les remblais sont principalement constitués de couches sableuses parfois plus ou moins argileuses et/ou graveleuses. Ils sont recouverts d'un voile béton. Un déchargeoir dit « déchargeoir de Neuzy » est situé en rive droite de la rigole en amont du pont canal. Il est en pierre et il permet d'une part de vidanger le bief de Digoin et d'autre part d'évacuer les excédents de débit de ce bief vers la Bourbince.

PROBLÈMES CONSTATÉS

Dans la nuit du 5 au 6 janvier 2001, suite à de fortes pluies, la digue de la rigole de l'Arroux s'est rompue à proximité du pont canal sur la Bourbince, près d'une zone de transition bétonnée. Une brèche d'une vingtaine de mètres s'est alors formée (figure 2). L'ensemble des maté-



▲ Figure 2 – Rupture des digues de la rigole de l'Arroux (DDE Saône et Loire).

▲ Figure 1 – Plan de situation de la Rigole de l'Arroux (BCEOM, 2002).

2. Berrichon : ancien bateau de transport, devenu très rare, aux dimensions adaptées à la navigation sur le canal de Berry, au gabarit réduit ; un berrichon a approximativement les dimensions d'un wagon corail, soit 27,50 m sur 2,60 m.

riaux constituant la digue a été emporté dans la Bourbince et le bief aval de la rigole de l'Arroux a été partiellement vidé, ne laissant plus que l'écoulement d'un ruisseau en fond de canal. L'alimentation du canal du Centre à partir de cette rigole a alors été stoppée. Quelques mois après, une succession de petites ruptures des parois intérieures de la digue sont apparues sur la mi-hauteur et sur une longueur de 60 m environ à partir de la brèche.

RÉPARATIONS

Les travaux de réparation ont eu pour objectif d'améliorer le déchargeoir et de reconstruire, en utilisant des solutions de DEG ou de tunage bois, les portions de rigoles endommagées.

Dans un premier temps, les travaux ont consisté à curer la vase épaisse d'environ 1 m, et à édifier le corps du remblai avec des matériaux graveleux

► Figure 3 – Mise en place du DEG (DDE Saône et Loire).



ou sableux traités avec un liant hydraulique, à une teneur de 3,5 % (pentes de l'ordre de 1V/2H). La dalle de béton existante est conservée pour jouer le rôle de sol support lors de la mise en œuvre du DEG dans les sections où son état le permet. Au total, le DEG a été mis en place sur une superficie de 2 400 m² (figure 3).

En section courante, le complexe d'étanchéité est composé d'une géomembrane et de deux géotextiles de protection, le tout étant ancré dans des tranchées latérales. La géomembrane est de type PEHD³ (1,5 mm d'épaisseur), et les géotextiles inférieurs et supérieurs sont des géotextiles anti-poinçonnants non tissés aiguilletés. Le géotextile inférieur est doublé d'un géocomposite drainant muni de mini-drains ; sur la section reconstruite, un drain de collecte a été posé à chacune des jonctions talus/radier. Une dalle en béton d'épaisseur 10 cm armée d'un treillis métallique constitue le revêtement de l'ensemble du dispositif.

RETOUR D'EXPÉRIENCE

Les travaux de réparation ont commencé à la fin 2003 et ont duré jusqu'en 2004. Le coût de la réfection s'est élevé à environ 553 000 € HT (hors coût supplémentaire de l'argile sur la section adjacente). À la mise en eau, des fuites sont apparues au niveau du raccord entre les deux sections courantes (DEG et tunages bois). À proximité de cette jonction, un trou d'érosion s'est formé sur l'argile jusqu'au béton (figure 4). La protection béton a été démolie jusqu'à environ 7 m de la transition et une nouvelle géomembrane a été mise en place (Cete de Lyon, 2004). Malgré cette reprise de la jonction en 2005, les fuites persistent toujours à l'heure actuelle. En fonction des intervenants sur ce chantier, les avis sur la provenance des fuites divergent. Elles pourraient provenir des culées du pont-canal adjacent et/ou

de problèmes de conception et de réalisation liés au raccordement des deux sections. À l'origine du mauvais raccordement entre les deux sections, plusieurs causes sont avancées :

- le mauvais encastrement de la géomembrane dans le noyau d'argile et probablement le manque de soin lors de la mise en place, engendrant ainsi des blessures de la géomembrane ;
- l'absence d'arrêt du géotextile (au niveau du raccord dans l'argile), qui a certainement joué un rôle de drain ;
- la non-étanchéité des raccords sur les ouvrages béton.

Les prochains travaux sur ce secteur auront pour objectif l'étanchement du pont-canal. À leur issue, on pourra conclure sur l'exacte provenance des fuites.



▲ Figure 4 – Trou à la jonction tunage bois et DEG (DDE Saône et Loire).

Expérimentation *in situ* de protection de la géomembrane par éléments suspendus

Présentation et objectifs

L'objectif de cette première expérimentation 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 (Flaquet-Lacoux *et al.*, 2004) ; 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.

Comme il n'a pas été possible de vider le canal retenu pour cette première expérimentation, seules des protections pouvant être installées en eau ont été choisies. D'autres expérimentations sont prévues pour tester les autres types de protection déjà utilisées ou envisagées (dalles béton et enrochements notamment). Ces protections sont mises en œuvre dès l'installation du DEG et à ce jour, elles n'ont pas été réalisées en réparation de protections défailtantes.

Dans ces conditions, trois types de protection ancrée en tête de talus sont testés : gabions, blocs de béton fixés sur un géotextile de renforcement et blocs de béton suspendus à l'aide de câbles métalliques. Le comportement général de ces protections est également suivi.

Cette expérimentation est présentée ici de manière synthétique, avec ses principaux enseignements ; le lecteur en trouvera une description détaillée dans la communication de Flaquet-Lacoux et al. (2004).

Mise en œuvre de l'expérimentation

Les caractéristiques principales des matériaux de protection retenus sont regroupées dans le tableau 1. Les gabions, dont la structure est constituée par un grillage métallique, ont été remplis de granulats 30/120 mm sur 15 à 17 cm d'épaisseur pour un poids évalué à environ 250 kg/m². Les matériaux numérotés 2 et 3 sont des pavés en béton ; dans le cas du matériau 2, ces pavés (32 x 40 cm) sont fixés à un géosynthétique de renforcement par l'intermédiaire de chevilles en matière plastique coulées dans le béton lors de la fabrication des nappes ; pour le matériau 3, les pavés (48 x 40 cm) sont reliés entre eux par des câbles métalliques. Les câbles ou la nappe géotextile permettent de solidariser entre eux les pavés et de les ancrer en tête de talus (figure 5).

L'expérimentation a été mise en œuvre sur le Canal du Nord, les 5 et 6 novembre 2002, sur une zone en ligne droite, à égale distance entre 2 écluses, zone qu'il était prévu de vider dans les mois qui suivaient la réalisation ; ceci a permis des mesures en conditions de vidange. Les pentes des berges de ce canal, de gabarit moyen, sont de 2/3 ; il est étanché par des dalles en béton.

Les DEG testés ont été mis en œuvre sur ces dalles. Chaque planche 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

N° planche	1	2	3
Protection	M1 : Gabions	M2 : Béton/GSY-R	M3 : Béton/Câbles
Fournisseur	France-Gabion	VDB Béton	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



▲ Figure 5 – Mise en place d'un élément de pavés béton.

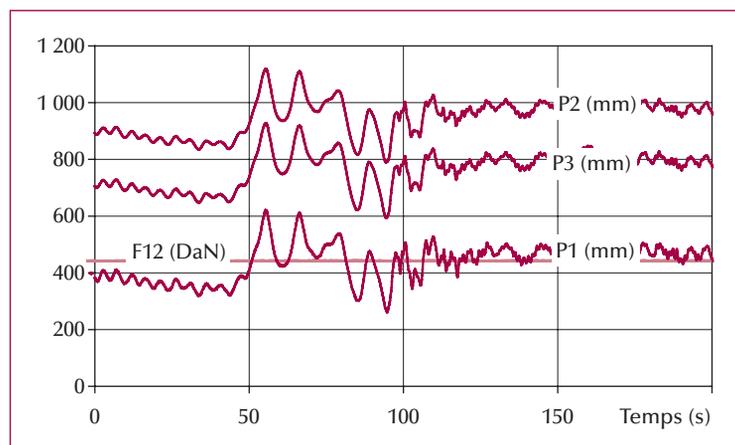
du matériau de protection considéré. Chacune des planches comporte trois éléments identiques de 2 m de large chacun ; les mesures sont effectuées sur l'élément central de façon à éviter leur perturbation par des phénomènes de bord. Chaque planche repose ainsi sur une dalle de béton existante de 6 m de large. Ce support ne représente pas un cas réel mais n'était pas un inconvénient pour les mesures envisagées, le glissement étant prévu au-dessus de la géomembrane sur sa face lisse.

Premiers résultats

L'objectif des mesures est de pouvoir vérifier les calculs théoriques de stabilité des DEG mis en œuvre. Pour ce faire, sont mesurées les pressions d'eau sur et sous la protection ainsi que les forces de retenue. La fréquence des mesures a été fixée de façon à suivre l'évolution des pressions d'eau en fonction des vagues.

Un exemple de résultats de mesures des pressions exprimées en hauteur d'eau et de force de retenue (F12 = tension exercée sur l'ancrage) est donné par la figure 6 ; P1 et P2 sont mesurées sous la protection en gabion pour connaître les sous-pressions, et P3 sur la protection pour suivre les variations du niveau de l'eau.

▲ Tableau 1 – Caractéristiques principales des matériaux de protection.



▲ Figure 6 – Exemple de mesures sur la planche 1.

Les mesures de pression montrent que, aussi bien sous les gabions que sous les deux protections par pavés en béton, il ne s'exerce pas de sous-pressions quand la vague redescend.

Les valeurs des forces calculées et mesurées sont proches pour le cas du canal vide, mais lorsque le canal est en fonctionnement, les mesures permettent de constater une augmentation des forces avec le temps. Cette augmentation est constatée entre l'installation et la vidange du canal et entre la vidange et les dernières mesures. Différentes hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ce phénomène :

- des actions susceptibles d'augmenter la force de retenue, telles que des vagues d'amplitudes plus importantes que celles mesurées ou les variations de température, peuvent avoir des effets non réversibles se cumulant. Ces actions entraîneraient un déplacement vers le bas qui ne peut être compensé par un retour à la position initiale lorsque la sollicitation diminue : il faudrait en effet dans ce cas une force orientée vers le haut du talus supérieure à l'action du poids plus la résistance au frottement ;

- une usure au niveau de l'interface, sous l'effet des actions dynamiques, pourrait diminuer les angles de frottement aux interfaces ;

- des sous-pressions partielles en partie haute des dispositifs ne peuvent pas être exclues.

En conclusion, la présente expérimentation apporte des informations utiles :

- la mesure de l'angle de frottement au plan incliné est cohérente avec les mesures de force « canal vide » ;

- les forces calculées dans le cas du canal vide, avec un angle de frottement en conditions humides, peuvent être inférieures aux forces réelles qui augmentent au cours du temps, vraisemblablement jusqu'à une valeur maximum correspondant au cas le plus défavorable qui ne serait pas le canal vide. Ce point reste à approfondir.

Parallèlement, l'observation des planches expérimentales lors de la vidange du canal, trois ans et demi après leur mise en œuvre, a montré un bon comportement des protections testées, en particulier sans déplacements ni endommagements. Il est juste à noter un déplacement de quelques granulats pour la protection gabions, mais cela n'altère en rien l'efficacité de la protection.

Conclusions

Les retours d'expérience de réhabilitation par géomembrane de l'étanchéité de canaux navigables en France répertoriés et analysés ici montrent 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, comme l'illustre l'exemple de la rigole de l'Arroux, lors d'une réhabilitation de l'étanchéité avec plusieurs solutions techniques (tunage, palplanches, DEG...), les zones de raccordement et de transition doivent faire l'objet d'une vigilance plus particulière.

S'appuyant en partie sur les réalisations ayant fait l'objet de cet article, 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. Les résultats de cette étude 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 de déterminer la stabilité des différentes structures de protection de la géomembrane. □

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 quatorze réalisations en France) et la réalisation d'une expérimentation *in situ* sur une berge de canal. 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. Un exemple de réhabilitation instructif sur la rigole de l'Arroux est présenté en détail.

Abstract

A series 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 fourteen projects in France) and the carrying out of an *in situ* experiment on a canal bank. 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. An interesting example of rehabilitation on "Rigole de l'Arroux" is presented in details.

Bibliographie

- BCEOM, 2002, *Canal du Centre – Études préalables aux travaux de la Rigole de l'Arroux*, Études hydrauliques, 36 p.
- CETE de Lyon, 2004, *Contrôle extérieur de travaux « étanchéité »*, Contrôle de chantier du 15 juin 2004, Rigole de l'Arroux, 6 p.
- FLAQUET-LACOUX, V., MALASCABES, M., GIRARD, H., POULAIN, D., LINO, M., 2004, Réhabilitation de l'étanchéité de canaux navigables par géomembranes, in *Colloque « Sécurité des digues fluviales et de navigation »*, CFGB-MEDD, Orléans, France, 25-26 novembre 2004, p. 505-530.
- FondaConcept, 2002, Restauration de la rigole de l'Arroux à Digoin, in *Dossier de consultation des entreprises – Cahier des clauses techniques particulières*, p. 12-30.
- Fondasol – Agence de Dijon, 2001, Digoin Rigole de l'Arroux, in *Rapport d'études*, p. 4-34.
- VNF, 2001, *Canal du Centre – Rigole de l'Arroux – Pont-canal sur la Bourbince – Travaux suite à l'effondrement de la digue*, Plan de gestion de projet, 22 p.