

RÉNOVATION DE RÉSERVOIRS EN BÉTON BITUMINEUX – SOLUTIONS ENVISAGÉES ET CONTRAINTES DE DIMENSIONNEMENT

RENOVATION OF RESERVOIRS WITH BITUMINOUS CONCRETE FACING - PROPOSED SOLUTIONS AND DESIGN CONSTRAINTS

Benoit HOFFER, Étienne MONSEUR
Tractebel Engineering, Bruxelles, Belgique

RÉSUMÉ – De nombreux réservoirs de centrales de pompage turbinage ont été construits dans les années 1970. Leur étanchéité, fréquemment réalisée en béton bitumineux, devient vieillissante et des travaux de rénovation doivent être entrepris pour prolonger la vie de ces ouvrages. Les solutions au moyen de géomembranes sont une alternative aux solutions en béton bitumineux. Le choix du type d'étanchéité nécessite une analyse multicritère.

Mots-clés : masque en béton bitumineux, rénovation d'étanchéité, réservoir, centrale de pompage-turbinage, géomembrane.

ABSTRACT – Many reservoirs used for pumped storage power plants were built in the 1970s. Bituminous concrete facing were frequently used as water barrier on the upstream face of pervious embankment. These are aging and renovations should be made to extend the life of these infrastructures. Solutions using geomembrane are an alternative to bituminous concrete solutions. Choosing the best liner requires a multi-criteria analysis.

Keywords: bituminous concrete facing, watertightness renovation, water reservoir, pumped storage power plant, geomembrane.

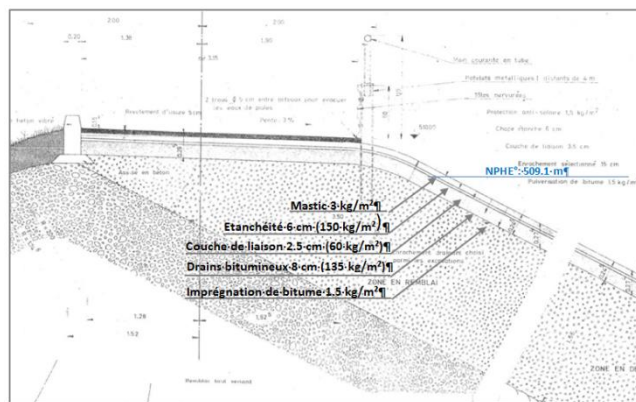
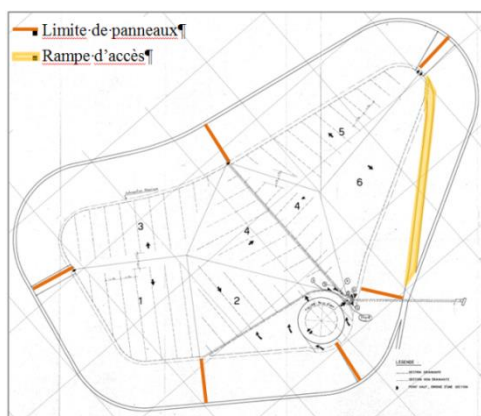
1. Introduction

1.1. Présentation du site

La centrale de pompage turbinage de Coë (Belgique, Province de Liège) exploite un ancien méandre de l'Amblève comme réservoir inférieur. Les deux bassins supérieurs (BS1 et BS2), construits le premier en 1969 et le second en 1975, ont chacun une capacité de plus de 4 000 000 m³ et une superficie de talus intérieurs de l'ordre de 10 ha. De par le principe même de fonctionnement de la centrale, les bassins sont remplis et vidés quotidiennement, ce qui conduit à un marnage journalier pouvant dépasser 20 m. Les talus intérieurs présentent une pente de 2H : 1V et un rampant pouvant localement dépasser 60 m. L'étanchéité des bassins réalisée en béton bitumineux vieillit avec le temps et son comportement devient plus fragile ce qui nécessite des réparations de plus en plus fréquentes. En conséquence, l'exploitant a décidé de rénover entièrement l'étanchéité des talus du bassin le plus ancien (BS1).

Le complexe d'étanchéité actuellement en place est composé (Fig. 2) de 2 couches de béton bitumineux (drainante et étanchéité) séparées par une couche de liaison. L'étanchéité est recouverte d'une couche de « mastic » de protection contre les rayonnements UV. Ce béton bitumineux comporte 1 à 2% d'amiante, ces fibres permettant de réduire le fluage durant la mise en œuvre.

Un dispositif de drainage est présent sous la couche d'étanchéité. Il est constitué de drains et de collecteur, canalisant les eaux récoltées au sein de la couche d'enrobé drainant des différents panneaux hydrauliquement indépendants (Fig. 1). Les débits de fuite sont mesurés et enregistrés en continu. Ces mesures, couplées avec la mesure du niveau du bassin, permettent, lorsque des fuites sont détectées, de limiter les zones à investiguer en vue de localiser les fuites et de permettre ainsi une intervention rapide pour effectuer les réparations.



Figures 1 et 2. Vue en plan des bassins et coupe type.

1.2. Rénovations de l'étanchéité avec du béton bitumineux et alternatives

Le béton bitumineux d'étanchéité étant altéré localement sur des profondeurs plus ou moins importantes, un décapage partiel de l'étanchéité altérée doit être réalisé. Dans le cas d'une rénovation « à l'identique » (application d'une nouvelle couche de béton bitumineux), un des principaux enjeux consiste à garantir la qualité de l'accrochage et sa tenue dans le temps.

Les opérations de « rabotage » de 100 000 m² des enrobés situés sur les talus sur des épaisseurs de 6 à 8 cm nécessaires pour le remplacement de la couche d'étanchéité impliquent de gérer également la problématique de l'évacuation et du stockage des produits de rabotage contenant de l'amiante.

Une première rénovation effectuée selon cette technique a été réalisée en 2003 sur un des panneaux du BS1 (le plus altéré). Suite à cette rénovation, il a été constaté assez rapidement l'apparition de boursouflures sur une grande partie de la nouvelle étanchéité, liées selon toute vraisemblance au manque d'adhérence de celle-ci aux couches inférieures. Le retour d'expérience de rénovations effectuées sur d'autres bassins au moyen d'une couche rapportée de béton bitumineux montre des déconvenues semblables. Parmi les hypothèses émises pour expliquer la cause des défauts observés, on citera en particulier la problématique du drainage sous étanchéité, le manque de continuité de l'étanchéité et le manque d'adhérence du béton bitumineux sur le matériau existant. Ces aspects constituent les points d'attention les plus importants à prendre en compte lorsque l'on envisage la rénovation de ce type de structure.

Cette première expérience réalisée sur le BS1 et le manque à ce jour de retour d'expérience positive pour cette technique de rénovation combinées aux coûts importants associés au traitement des matériaux de « rabotage » contenant de l'amiante ont conduit Tractebel à étudier d'autres alternatives de rénovation ayant recours à l'utilisation de géosynthétiques. En cas d'utilisation de géomembranes les moyens de mise en œuvre doivent tenir compte des points d'attention énoncés ci-dessus auxquels il convient d'ajouter la problématique relative à la résistance au vent.

1.3. Méthodologie retenue pour le choix des produits

La démarche suivie fin 2014, début 2015 a comporté 3 étapes :

- une présélection de 3 géomembranes de type différent : thermoplastique (PVC), élastomère (EPDM) et bitumineuse. Les produits choisis dans ces différentes catégories étaient les plus à même de répondre aux contraintes de longévité dans un contexte d'exposition aux rayonnements UV ;
- une rencontre avec des producteurs/applicateurs de ces produits afin de leur permettre de bien comprendre les enjeux du projet et leur permettre ainsi d'étudier des propositions techniques incluant les contraintes locales ainsi que les aspects de mise en œuvre, coûts, délais de réalisation, maintenance ;
- à l'issue de cette analyse, des visites ont été organisées pour les 2 produits qui se sont révélés les plus prometteurs et pour lesquels on a voulu obtenir le retour d'expérience des exploitants concernés par les rénovations effectuées.

Une comparaison de différentes techniques a ensuite été menée au travers d'une analyse multicritère visant à permettre le choix de la technique la plus appropriée.

2. Sollicitations

Le vieillissement de l'étanchéité est observé et suivi depuis de nombreuses années et lors de réparations importantes en 2004, 316 interventions localisées sur des défauts profonds ont été réalisées. Leur répartition en fonction du niveau où elles ont été effectuées avait montré (Figure 3) que la grande majorité (97,5%) des défauts était située au-dessus de la cote 503 (Coyné et Bellier/Tractebel Engineering, 2004).

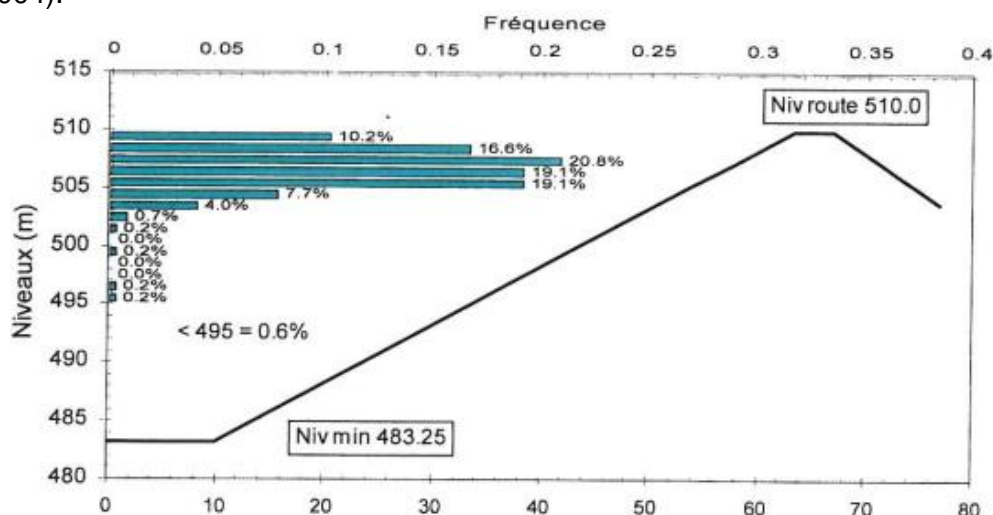


Figure 3. Répartition des dégradations de l'étanchéité en fonction du niveau.

Les principales contraintes et aspects à prendre en compte pour le choix de la solution technique sont : exposition aux rayonnements UV, variations de température, résistance au vent, marnage quotidien du plan d'eau, contraintes d'ancrage et de drainage sous membrane, etc.

2.1. Vent

La dépression induite par le vent peut être définie à partir de la mécanique des fluides. On peut considérer qu'elle suit une loi de Bernoulli, en fonction du carré de la vitesse.

Le bulletin 135 du Comité des Grands Barrages (CIGB, 2010) présente les principes de calcul des forces de dépression (Fig. 4) ainsi que les dépressions théoriques à utiliser en fonction de la vitesse du vent (tableau 1).

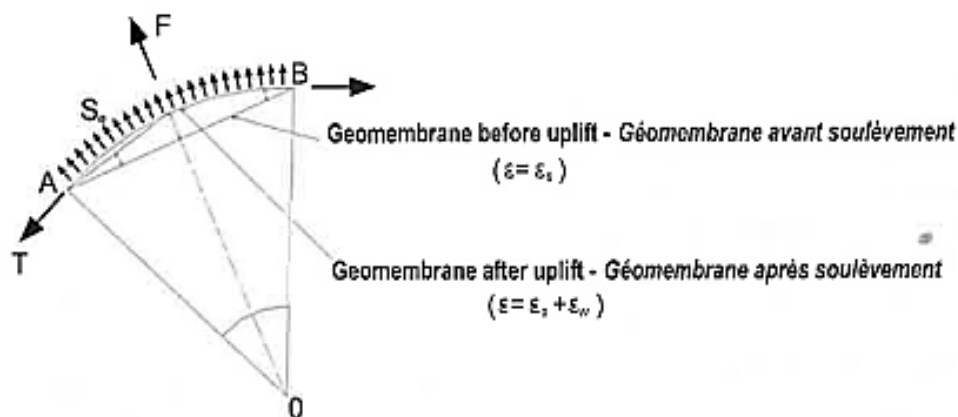


Figure 4. Calcul des forces de dépression.

Tableau 1: Dépression en fonction de la vitesse du vent

V (km/h)	20	40	60	80	100	140	180
P (Pa)	20	80	170	310	480	920	1520

Par interpolation, un vent de 160 km/h (~45 m/s) conduit à une dépression de 1200 Pa (hors coefficients de réduction ou de sécurité).

À titre d'exemple, des ancrages espacés de 5 mètres et soumis à des vents de 160 km/h devront être capables de reprendre une force de soulèvement de 6 kN/m (sans prendre en compte les efforts de second ordre).

Pour le vent, les données météorologiques permettent généralement d'approcher les vitesses moyennes. Les vitesses de rafale à prendre en compte sont souvent définies en fonction de la région de la même manière que pour le dimensionnement des toitures. Toutefois, compte tenu de la taille des ouvrages et des possibles effets de site, des études aérodynamiques pour évaluer la dépression réelle dans le bassin peuvent permettre d'éviter de prévoir des ancrages permanents trop importants.

2.2. Drainage et détection de fuite

Si de l'eau infiltrée s'insinue entre la surface d'étanchéité existante et la géomembrane sans pouvoir être évacuée, des sous-pressions locales pourraient atteindre 2 à 3 bars en pied de talus. L'importance d'un drainage de l'ensemble de la surface via un dispositif de drainage (existant ou à créer) est d'autant plus important que les marnages sont quotidiens et de grande ampleur.

Outre l'évacuation des débits de fuites, la possibilité d'assurer une localisation aisée de celles-ci, par exemple au moyen de fibres optiques, afin de permettre la réparation de l'ouvrage est également envisagée.

Le béton bitumineux d'étanchéité étant altéré localement sur des profondeurs plus ou moins importantes, un décapage partiel de la couche altérée ne peut garantir de retrouver un béton bitumineux sain et étanche en tout point de la surface de contact entre l'existant et la rénovation. La présence de zones altérées piégées entre l'étanchéité rapportée et le matériau restant en place est probablement à l'origine des défauts observés lors de l'utilisation de béton bitumineux comme technique de rénovation. La saturation progressive de ces poches et des cycles répétés de vidange et remplissage pourraient expliquer un décollement par une mise en pression de l'étanchéité rapportée. Une fuite dans un dispositif d'étanchéité par géomembranes pourrait conduire à une mise sous pression de l'étanchéité si le drainage n'est pas correctement assuré.

Dans le cas du BS1 de l'installation, un dispositif de détection de fuite est présent. Il consiste en 6 panneaux hydrauliquement indépendants. Ce dispositif couplé à un suivi des débits de fuite en fonction du temps et à un enregistrement des niveaux du bassin en fonction du temps permet de localiser rapidement les zones de fuite en termes de cote et de zone de bassin. La rénovation du bassin doit permettre d'o

2.3. Résistance aux UV

Le marnage quotidien résultant du fonctionnement de l'installation implique une exposition à l'ensoleillement importante de la couronne supérieure du bassin. Les durées d'ensoleillement peuvent dépasser 2000 heures/an, ce qui accélère le vieillissement des bétons bitumineux et nécessite l'application régulière, environ tous les 10 ans, d'un mastic de protection permettant de ralentir le vieillissement du revêtement.

Les membranes ont des résistances aux UV variables en fonction de leur nature. Le PVC, dont les résistances aux UV sont souvent considérées inférieures à celles du PEHD, peut, dans le cas de formulation spécifique, présenter des résistances aux UV de plus de 50 ans. Le tableau 2, ci-dessous, est un extrait du bulletin 135 (CIGB, 2010). Il présente les principaux matériaux utilisés en membranes exposées pour la construction ou la rénovation de barrages :

Tableau 2. Géomembrane dans les barrages exposés

Type de géomembrane	Matériau de base	Nombre total de barrage (exposée)	%
Polymère	Polychlorure de vinyle (PVC) – Plastifié	80	75,4%
Polymère	Polyoléfine (PEHD)	3	2,8%
Polymère	Caoutchouc, membrane butyle ou éthylène-propylène-diène (EPDM),...	5	4,7%
Polymère	Polyéthylène chlorosulfoné	3	2,8%
Polymère	Géotextile imprégné de polymère (fabriquée sur place)	2	1,9%
Polymère	Polyoléfine (PP)	3	2,8%
Bitumineux	Bitume oxydé (préfabriquée)	7	6,6%
Bitumineux	Bitume oxydé (fabriquée sur place)	3	2,8%

2.4. Dilatation thermique

Les membranes ont des comportements différents en fonction des variations de température. Les coefficients de dilatations thermiques linéaires varient de 0,05 à 0,25 mm/m.°C en fonction du type de membrane (Koerner, 1996).

À titre d'exemple, les membranes PEHD qui ont les coefficients les plus élevés pourraient subir des déformations de l'ordre de 0,5% suite aux seules variations de la température de l'air et ce, en considérant un coefficient de dilatation thermique moyen de 0,14 à 0,16 mm/m.°C. De plus, un écart de 30°C entre la température de pose et les extrêmes de température de l'air peut générer l'apparition de nombreux plis ainsi que des concentrations de contraintes à proximité des ancrages et éléments de fixation. La température réelle de la géomembrane exposée au soleil peut dépasser 80°C (Pelte et al., 1994).

2.5. Résistance au poinçonnement

Contrairement aux étanchéités à base d'enrobés bitumineux, les géomembranes sont sensibles au poinçonnement généré par exemple par la présence sur les talus et sur le fond du bassin d'objets divers (pierre, boulons,...), introduits par inadvertance lors d'opérations de maintenance ou de façon malintentionnée et ce, en dépit de la mise en place de clôtures empêchant l'accès aux installations.

Dans ces conditions, il est nécessaire d'adopter des dispositions spécifiques complémentaires pour éviter que le contact de ces objets avec la géomembrane ne la détériore, ou de démontrer que le dispositif permet de faire face à ces sollicitations.

D'une façon générale, en cas de rénovation de bassins non clôturés, les techniques de rénovation par géomembrane exposées sont à éviter.

2.6. Durée de vie de l'ouvrage et garantie

Compte tenu de l'ampleur des travaux, de la perte de production résultant de la mise à l'arrêt de la centrale durant les travaux et des coûts associés, les techniques de rénovations adoptées doivent être fiables, robustes et permettre de garantir une durée de vie de minimum 40 ans.

La facilité en termes de manutention du matériel et de préparation des surfaces, ou encore, les délais et durées d'intervention pour effectuer des réparations sont autant d'éléments à considérer dans le choix de la solution technique. Ce choix intègre les exigences quant à l'état de la membrane existante (propre et sèche) et quant à l'évolution de ses caractéristiques (notamment de soudabilité) dans le temps pour assurer une bonne liaison avec la nouvelle étanchéité.

2.7. Expérience et garantie de bonne exécution

Compte tenu des enjeux, il importe que l'exploitant puisse obtenir une garantie maximale de l'ouvrage. Contrairement à la pratique dans le domaine des géosynthétiques, où l'applicateur n'est responsable que de la géomembrane qu'il pose, les exploitants de centrale souhaite faire appel à un interlocuteur unique qui prend l'entière responsabilité de la rénovation qu'il propose. Pour répondre à cette demande, il est nécessaire de recourir à des groupements d'entreprises où le fabricant de la membrane s'associe avec un applicateur et d'autres entreprises pour offrir une garantie maximum de l'ouvrage rénové. Cette période de garantie varie généralement de 5 à 10 ans.

Des essais préalables pour valider les techniques proposées, le contrôle de la qualité des produits et la mise en œuvre sont, à ce titre, indispensables.

Un critère de performance doit être défini en termes de débit de fuite. La rénovation doit permettre de supprimer les interventions de réparation annuelles en assurant des débits de fuite inférieurs aux exigences de performance initiales fixées en l'occurrence à 630 litres/minute pour la totalité du bassin BS1. Actuellement, grâce à des interventions de réparation régulièrement effectuées par l'applicateur d'origine de l'étanchéité, les débits mesurés restent inférieurs à 100 l/min, malgré un ouvrage vieillissant.

3. Mise en œuvre et organisation de chantier

Les exploitants de bassin de centrale de pompage turbinage sont soumis à des contraintes fortes en termes de production d'énergie et donc de fiabilité de leur installation. Les périodes d'arrêt sont rares et limitées aux inspections périodiques des ouvrages et aux travaux de réparations/rénovation. Les durées de ceux-ci doivent être réduites au maximum pour limiter autant que possible les pertes d'exploitation.

3.1. Organisation du chantier

La préparation de ce type de chantier est très exigeante. Au-delà des procédures spécifiques pour la gestion des matériaux contenant de l'asbeste, tous les points particuliers du projet doivent avoir été étudiés, une analyse de variante pour anticiper les situations imprévues en cas d'écart entre les prévisions et les conditions de terrain est également nécessaire. Le planning des livraisons, les approvisionnements sur chantier, la gestion des équipes, l'organisation des postes de travail sont autant de points qu'il convient de maîtriser parfaitement pour éviter tout dérapage du planning des travaux et la perte de production d'énergie qui en résulterait.

3.2. Raccordements particuliers

3.2.1. Ancrages

Les ancrages de la membrane à prévoir en crête de talus ne constituent pas un problème majeur. Leurs mises en place nécessitent toutefois une réflexion sur les moyens d'exécution à mettre en œuvre compte tenu des accès disponibles (route de crête étroite et barrière de sécurité présente sur toute la périphérie du bassin). Ces ancrages doivent être réalisés de façon à éviter toute infiltration d'eau en provenance de la route sous le dispositif d'étanchéité.

Les ancrages de pied doivent être parfaitement étanches sous des pressions d'eau de près de 3 bars. Ils doivent être positionnés pour ne pas entraîner de rétention d'eau lors de vidange, ne pas gêner la circulation d'engins sur le fond de bassin lors des périodes d'entretien, mais présenter une résistance suffisante pour éviter toute dégradation de la membrane suite à une circulation accidentelle lors des visites d'inspection périodiques.

Les ancrages intermédiaires doivent assurer la résistance au vent, aux sous-pressions éventuelles, mais aussi permettre le cas échéant d'assurer une séparation entre zones hydrauliquement indépendantes. Les calculs effectués pour déterminer les efforts à reprendre par les ancrages devront être validés par des tests en vraie grandeur sur site afin de définir le type de fixation et leur espacement.

Pour le projet étudié, des procédures particulières doivent être appliquées pour tenir compte de la présence d'amiante dans le béton bitumineux d'étanchéité afin d'assurer la protection des travailleurs et le respect de la réglementation en vigueur en matière de protection de l'environnement.

3.2.2. Rampe d'accès

La rampe d'accès au fond de forme est un ouvrage nécessitant une analyse détaillée. Outre la continuité de l'étanchéité, la stabilité de la rampe lors du transport de charrois à fort tonnage et la résistance des différentes couches en cas de freinage doivent être attentivement étudiées.

3.2.3. Raccord au réseau de drainage existant

Le réseau de drainage existant est situé sous l'étanchéité en béton bitumineux. Le dispositif de collecte des débits de fuite sous la géomembrane devra être connecté aux dispositifs de drainage existants. Cela implique le démontage dans certaines zones de l'étanchéité existante pour assurer la continuité du dispositif.

Compte tenu du différentiel de pression entre le bassin et le réseau de drainage, il convient de soigner particulièrement la réalisation de ce réseau de drainage afin qu'il ne constitue pas un point de faiblesse du bon fonctionnement du dispositif d'étanchéité.

4. Avantages et inconvénients des produits

4.1. Géomembrane thermoplastique (PVC)

La géomembrane PVC développée par la société CARPI© associe une géomembrane PVC, dont l'épaisseur varie en fonction des sollicitations de l'ouvrage et de la longévité demandée, et un géotextile accolé mécaniquement et thermiquement. Les plastifiants et autres adjuvants sont soigneusement dosés pour limiter la migration des plastifiants et assurer la durabilité du produit. L'utilisation de ces produits, associés à des dispositifs d'ancrage avec pré-tensionnement de la géomembrane, possèdent de très nombreuses références. Ce mode de pré-tensionnement permet notamment d'éviter l'apparition de plis et les dommages qui peuvent en résulter lors de la formation de glace.



Figure 5. Rénovation en PVC sur le barrage de Moravka (Tchéquie).

Dans le cadre du projet, nous avons pu nous rendre sur le site de Moravka (Fig. 5), en Tchéquie, pour observer le comportement de l'ouvrage suite à la rénovation de son dispositif d'étanchéité. Sur ce site, des dégâts apparus en 1996 ont nécessité d'importants travaux entre 1997 et 2000 parmi lesquelles la mise en place d'un complexe d'étanchéité et drainage par géomembrane PVC. Après plus de 15 ans d'exploitation, le comportement du nouveau complexe d'étanchéité est toujours satisfaisant, les débits de fuite, mesurés, restant dans les limites des prescriptions.

Dans le cadre d'un projet de bassins exposés au Panama, des essais sur une géomembrane PVC, plus épaisse, a permis de démontrer à l'exploitant la qualité du produit pour lequel une résistance aux UV de 100 ans minimum était exigée. Un programme d'essais d'incubation de géomembranes en PVC de Carpi est en cours de réalisation depuis 2007 au Laboratoire du GRI - Institut de Recherche Géosynthétiques du GSI, Institut Géosynthétiques de l'Université Drexel aux États Unis. Les essais sont effectués sur cinq géomembranes de différentes formulations, pour prédire leur durabilité. Les essais sont réalisés dans un dispositif de résistance à l'usure par fluorescence ultraviolette (Ultraviolet Fluorescent Weathering Device) selon la norme ASTM D7238 pendant une période très prolongée (plus de 10 ans). Les incubations se sont poursuivies pour chaque formulation à 75 °C, 65 °C et 55 °C jusqu'à nos jours, et se poursuivront jusqu'à 2020. Dans ce contexte et malgré la mauvaise réputation des géomembranes PVC réputées très sensibles aux UV, ce type de géomembrane, pour autant qu'elle soit mise en œuvre par une entreprise réputée pouvant faire valoir de nombreuses références sur des ouvrages comparables, apparaît comme une des solutions techniquement les plus appropriées pour la problématique identifiée.

4.2. Géomembrane Bitumineuse (élastomère)

Ce produit est très utilisé en étanchéité de toiture. Il est facile à souder moyennant une préparation appropriée du support. Il est, par contre, habituellement mis en œuvre pour cette application avec des rouleaux de petite largeur et « collage » au support au moyen de chalumeau. Les géomembranes, utilisées en étanchéité de bassin, présentent des largeurs de lés beaucoup plus importantes, difficilement compatibles avec un collage sur l'entièreté de la surface.

Ce produit, très facile à raccorder sur un support en béton bitumineux, est particulièrement adapté à des réparations urgentes. Son utilisation pour une rénovation de grande ampleur nécessite encore des développements afin de démontrer sa fiabilité à long terme.

Les membranes bitumineuses ont une sensibilité aux UV intermédiaire entre l'EPDM et le PVC. Toutefois, la formulation particulière des membranes PVC (voir 4.1 ci-dessus) permet d'obtenir des membranes moins sensibles aux UV que les membranes bitumineuses.

Il est généralement recommandé que ces membranes soient recouvertes mais des études réalisées sur des membranes bitumineuses élastomères de 30 ans ont montré une faible détérioration du polymère de surface (Benchet et al., 2013). Le phénomène de micro-faïençage, observé quel que soit l'âge de l'échantillon considéré, n'impacte que le liant de surface et n'atteint pas l'armature du produit. Au fil du temps, ils notent une évolution de surface (du micro-faïençage vers le macro-faïençage), due non seulement aux phénomènes de thermooxydation et photooxydation mais également à des facteurs mécaniques. Les auteurs notent encore que les réparations liées à l'échantillonnage ont pu être réalisées sans problème, indiquant qu'après 30 ans, le liant est encore fusible pour cette opération. Lors des essais de laboratoire, les altérations en profondeur sont inexistantes, seule une légère modification de la température de souplesse pour les échantillons de 30 ans (-15 au lieu de -20°C) est constatée. Les auteurs estiment que la durabilité aux ultra-violets des géomembranes de la gamme TERANAP® 431 est garantie pour des périodes de 35 à 40 ans.

Des mesures de flux effectuées sur des échantillons exposés pendant 15 ans selon la norme NF P84-500, ont montré que l'étanchéité de la membrane bitumineuse élastomère présente une performance hydraulique après 15 ans permettant de satisfaire aux critères d'étanchéité (Touze-Foltz et al., 2015). Les membranes en bitume oxydé, mises en place à la même période, sur le même site et testées à cette occasion, ne satisfaisaient pas aux critères définis dans la norme et ne doivent pas être utilisées en conditions exposées.

Bien que le poids spécifique du produit, plus élevé que celui des autres membranes, puisse dépasser 5 kg/m², il n'est pas suffisant pour résister seul aux sollicitations de vent envisagées pour le projet. La réalisation d'ancrages complémentaires est indispensable. Une solution d'ancrage envisagée consistait à souder les lés au sol support au niveau des raccords.

La fiabilité des ancrages par soudure de la membrane au sol support, compte tenu de l'âge du sol support, doit être un point d'attention nécessitant des développements complémentaires pour valider la technique proposée. D'autres solutions telles que la pose de cordon d'enrobés (ancrage poids) ou la réalisation d'ancrage mécanique pourraient permettre d'assurer la stabilité du dispositif. La nécessité de réaliser des ancrages conduit à augmenter le coût de la solution et dans une moindre mesure, la durée des interventions alors que la compatibilité avec le support permettait d'espérer une solution simple, rapide à mettre en œuvre et donc globalement plus avantageuse.

La gestion d'un drainage sous membrane et d'un dispositif de détection de fuite, jugés indispensables à la stabilité du dispositif, doit être examinée sous l'angle du mode d'ancrage retenu et de sa compatibilité avec le dispositif d'étanchéité.

La réalisation d'essais en vraie grandeur, sur des rampants de grande longueur avec l'analyse du comportement en cas de défaut avéré devrait permettre de rassurer les exploitants sur la qualité du produit.

4.3. Géomembrane Élastomère (EPDM)

Ce produit, très utilisé en étanchéité de toiture, présente des résistances UV très élevées. L'analyse de l'évolution des propriétés de géomembranes EPDM sur le site d'El Boqueron à Tenerife a fait l'objet de deux publications récentes : l'évolution des caractéristiques mécaniques après plus de 18 ans d'exposition aux UV (Blanco et al., 2013) ainsi que l'évolution de la structure de la membrane au microscope à balayage, des mesures de flux et l'extraction des additifs (Noval et al., 2015). Ces essais ont permis de montrer que les propriétés de la géomembrane restaient compatibles avec les fonctions d'étanchéité. L'allongement à la rupture diminue en lien avec l'augmentation du module d'élasticité suite à l'augmentation de la réticulation.

La très bonne résistance aux UV, la grande élasticité des géomembranes EPDM et l'absence de tout hydrocarbure dans les eaux du bassin ont conduit à retenir ce produit comme une alternative à la membrane PVC. La préfabrication en usine de grands panneaux présentait également un grand intérêt vis-à-vis du délai de réalisation. La longueur maximale des panneaux manufacturés est un point d'attention compte tenu de la longueur des talus qui dépasse localement la longueur maximale des panneaux.

Malgré la bonne résistance au poinçonnement dynamique confirmée lors d'essais en laboratoire et la très grande élasticité du produit se déformant sans se déchirer sous une sollicitation importante, il n'a pas été possible de rassurer l'exploitant quant à la fiabilité de la membrane dans les zones particulièrement exposées au vu de la faible épaisseur du produit. La possibilité d'objectiver cette résistance à la déchirure ou au poinçonnement lors de la chute d'objet permettrait de mieux comparer les différents produits.

Une visite de plusieurs bassins d'irrigation de plus de 15 ans dans la région d'Alicante équipés de membrane Firestone© a permis de démontrer la qualité du produit et sa bonne tenue aux UV. Il nous a même été possible d'observer un bassin équipé d'une membrane Iso-Butyl de 40 ans pour lequel les principaux défauts observés étaient davantage liés à la dégradation du sol support sous l'effet des vagues, en l'absence de géotextile support. Les dispositifs de lestage présents sur certains bassins (Fig. 6), par contre dans une région moins exposée au vent et avec des rampants de taille plus réduite, ne sont pas transposables au projet de rénovation de bassins de très grande dimension.



Figure 6. Étanchéité en EPDM sur le réservoir de Mamusa (1997).

Enfin, bien que le produit soit très utilisé en couverture de toiture et que les principes d'ancrages soient comparables, le manque d'applicateurs expérimentés sur des grands ouvrages hydrauliques a constitué un handicap important pour les exploitants lors du choix du produit.

Les réparations nécessitent un matériel simple, aisément portable, mais outre les exigences de propreté et sécheresse du support, la durée de vulcanisation à froid pour atteindre 90% de la résistance de la géomembrane reste un point d'attention sur un bassin où le marnage est quotidien.

4.4. Évaluation du coût

L'analyse du coût d'une solution ne doit pas se limiter au seul calcul de l'investissement. Il doit intégrer l'ensemble des coûts liés aux travaux mais aussi ceux à prévoir pendant la vie de l'ouvrage. A moins de prévoir un contrat d'entretien, les coûts liés aux réparations ponctuelles sont difficiles à quantifier en termes de nombre d'interventions par an et étendues de celles-ci. Nous nous sommes bornés à intégrer la durée de vie de la rénovation, le coût des travaux et la durée du chantier (à travers un coût d'immobilisation de la centrale) dans la comparaison des différentes solutions.

5. Synthèse

Les bassins et barrages dont l'étanchéité a été réalisée en béton bitumineux dans les années 1970 arrivent progressivement en fin de vie et nécessiteront des rénovations plus ou moins importantes. Le recours à des géomembranes pour ces travaux de rénovation est une alternative intéressante qui peut présenter des avantages importants en termes de fiabilité, mais aussi de délai de réalisation, de coût, ainsi qu'en termes de facilité de réparation.

De nombreux produits sur le marché peuvent chacun, intrinsèquement, être considérés comme une bonne solution pour la rénovation d'étanchéité de bassins. Certains produits doivent être écartés sur base des contraintes liées à l'environnement du site (vent, exposition de l'étanchéité aux UV, gel-dégel,...), mais aussi sur base de la fréquence et de l'intensité des cycles de vidange/remplissage.

Une fois le produit choisi, et en fonction de l'expérience des applicateurs sur des ouvrages similaires, il convient de réaliser des tests de qualification plus ou moins importants, afin de démontrer la fiabilité du dispositif d'ancrage proposé et des dispositifs de détection de fuite et de drainage. Il est ainsi nécessaire d'inclure des tests in situ pour confirmer les résistances mobilisables de ces ancrages.

La solution la moins chère n'est pas toujours la solution pour laquelle le coût des investissements est le plus bas. La durée du chantier et la pérennité de la rénovation impactent fortement le coût global sur la durée de vie de l'ouvrage.

6. Références bibliographiques

- Benchet R., Herisson C., Gerbaud F., Croissant D., Grivaud S. (2013). Étude sur la durabilité des géomembranes en bitume élastomère exposées sur site depuis 6 à 30 ans. *CFG 9^o Rencontres Géosynthétiques*, 395-403.
- Blanco M., Touze-Foltz N., Amat B., Castillo F., Aguiar E. (2013). Comportement d'une géomembrane EPDM 18 ans après son installation dans la retenue d'El Boqueron. *CFG 9^{èmes} Rencontres Géosynthétiques*, 405-413.
- CIGB. (2010). Dispositifs par Géomembranes pour les barrages - principes de conception et retour d'expérience. *Bulletin 135. (Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 464 pages)*
- Koerner. (1996). *Designing with geosynthetics* (Prentice Hall, New Jersey, 783 pages).
- Peltet., Pierson P., Gourc J.P. (1994), Thermal analysis of geomembrane exposed to solar radiation", *Geosynthetics International*, 1, 21-44.
- Noval A., Blanco M., Farcas F., Touze-Foltz N. (2015). Étude de la durabilité de la géomembrane en EPDM installée dans la retenue d'eau "El Boqueron". *CFG 10^{èmes} Rencontres Géosynthétiques*, 399-407.
- Touze-Foltz N., Farcas F., Benchet R. (2015). Évaluation du vieillissement de deux géomembranes bitumineuses de différentes natures après 15 ans en service. *CFG 10^{èmes} Rencontres Géosynthétiques*, 417-425.