

ÉTANCHÉITE PAR GÉOMEMBRANES PVC DES BASSINS DE LA STATION DE TRANSFERT D'ÉNERGIE PAR POMPAGE D'AFOURER (MAROC)

WATERPROOFING BY PVC GEOMEMBRANE OF TWO PONDS AT THE PUMPED STORAGE STATION OF AFOURER (MOROCCO)

Daniel FAYOUX¹, Nicolas DEWALQUE²

¹ APPLIGEO, Les Ormes, France

² ALKOR DRAKA, Oudenaarde, Belgique

RÉSUMÉ – La station de transferts d'énergie par pompage d'Afourer a nécessité la construction de deux grands bassins ayant chacun une capacité utile de 1 260 000 m³ et une surface de l'ordre de 180 000 m², et de deux usines réversibles en série entre ces deux bassins. Les terrains sous l'assise des bassins sont constitués par des calcaires très perméables et même karstifiés pour le bassin supérieur. L'étanchéité a été réalisée par une géomembrane PVC de 1,5 mm d'épaisseur, protégée par du gravier sur le fond et du gravier et de l'enrochement sur talus. La communication présente le chantier et les planches d'essais, de 150 à 1000 m², pour vérifier la méthodologie de mise en œuvre et le comportement au poinçonnement du dispositif d'étanchéité.

Mots-clés : géomembrane, transfert d'énergie par pompage, poinçonnement, planche d'essais

ABSTRACT – The Afourer pumped-storage station project involves the construction and waterproofing of two ponds and the construction of two reversible plants. The reservoirs, which have a useable capacity of 1,260,000 m³ each, were installed on very permeable foundations and needed artificial waterproofing. The waterproofing solution chosen for both reservoirs is composed of a 1.5 mm-thick PVC geomembrane, which is protected by gravel on the bottom and gravel and rip-rap on slopes. This paper presents the worksite, the design of the lining system and the installation and quality control procedures. In particular, several field tests (from 150 to 1000 m²) have been carried out to verify the behaviour of complex geotextile geomembrane during tipping of the upper granular layers

Keywords: geomembranes, pumped storage station, puncturing, field tests

1. Introduction

La Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) d'Afourer est située au Maroc, au pied du Moyen Atlas, près de Beni Mellal, ville située à peu près à mi-distance entre Marrakech et Meknès. Afourer se trouve à la limite d'une plaine irriguée par les barrages existants de Bin El Ouidane et de Ait Ourda, situés sur un affluent de la rivière Oum Er Rbia. Le site d'Afourer permet de disposer de deux bassins présentant une dénivellation de près de 800 m sur une courte distance. Ces bassins peuvent être alimentés par piquage sur une galerie en provenance des barrages existants. Le débit de pompage est de 40 m³/s et le débit de turbinage de 70 m³/s, ce qui permet deux cycles complets par jour. L'installation fournit de l'électricité aux heures de pointe (la puissance installée représente 10% de la puissance installée du Maroc) et permet aussi d'optimiser la fourniture d'eau d'irrigation (Fayoux, 2005). Si le site est très favorable sur le plan topographique, il l'est beaucoup moins en ce qui concerne la réalisation des bassins, car ceux-ci doivent être réalisés dans des terrains calcaires très perméables, nécessitant donc la réalisation d'une étanchéité artificielle. Le Maître d'Ouvrage est l'Office National d'Électricité (ONE) ; le projet a été établi par EDF-CIH (EDF Centre d'Ingénierie Hydraulique) ; la fourniture et la pose ont été effectuées par ALKOR DRAKA.

2. Caractéristiques des bassins

Les deux réservoirs ont une capacité identique, mais leur forme et la pente des talus sont adaptées à chacun des sites. Le tableau 1 résume les caractéristiques principales de ces deux réservoirs.

Tableau 1. Caractéristiques des bassins d'Afourer.

	Bassin supérieur UR1	Bassin inférieur UR2
Cote de la crête de digue et talus	1284,50 NGM	492,00 NGM
Cote du pied extérieur de digue	1268,50 NGM	476,00 NGM
Longueur de digue	Env. 360 m	Env. 1000 m
Pente intérieure des talus: Zone en déblais Barrage	5H/1V 3H/1V	3H/1V 3H/1V
Pente extérieure du barrage	1,5/1	2,5H/1V
Cote minimale du fond de bassin	1270,93 NGM	477,50 NGM
Niveau des plus hautes eaux	1283,65 NGM	490,72 NGM
Profondeur d'eau maximale (m)	12,72	13,22
Niveaux extrêmes du plan d'eau en exploitation:	1273,20-1283,55 NGM	479,95-490,60 NGM
Volume utile entre les cotes d'exploitation	1.260.000 m ³	1.260.000 m ³
Surface à étancher :	Environ 180 000 m ²	Environ 160 000 m ²
Nature des fondations:	Calcaire karstique avec lapiaz et circulations karstiques.	Brèche calcaire et argile de décalcification

Le bassin supérieur se trouve dans une dépression naturelle formée par une zone calcaire très karstifiée, caractérisée par des lapiaz en surface et des circulations karstiques, masquées en surface par de l'argile de décalcification. Le bassin a une forme très arrondie et les pentes naturelles du terrain conduisent à opter pour une pente de talus de 5/1. Le bassin est fermé, vers l'intérieur de la cuvette naturelle, par une digue en enrochements de 18 m de hauteur maximale et de 360 m de longueur. La pente intérieure des talus de cette digue est de 3/1, la pente extérieure de 1,5/1 (Figure 1).

Le bassin inférieur est coincé entre le pied de la montagne et un canal d'irrigation. Il a une forme très allongée, avec une longueur d'environ 650 m (crête à crête) et une largeur comprise entre 220 et 280 m. Il est semi enterré, par creusement dans une brèche calcaire et fermé, sur pratiquement trois côtés, par une digue d'environ 1000 m de longueur et de hauteur maximale 15 m (Figure 2).



Figure 1. STEP d'Afourer – Bassin supérieur



Figure 2. STEP d'Afourer – Bassin inférieur

3. Le choix du dispositif d'étanchéité des bassins

3.1 Principes généraux

La perméabilité du sol en place, la nature calcaire des fondations et la présence de karst, au moins sur le bassin supérieur, et le fait d'avoir un marnage important deux fois par jour ne permettraient pas d'envisager une étanchéité par matériaux naturels. La solution par géomembrane a été retenue, d'une part, pour minimiser au maximum les pertes d'eau, qui est particulièrement précieuse sur un tel site, et, d'autre part, pour éviter les risques de débouillage de karst par suite d'infiltration.

3.2 Géomembrane protégée

Le choix s'est porté sur une géomembrane protégée, compte tenu des considérations suivantes :

- le fait de mettre une protection sur la géomembrane augmente sa durée de vie d'un facteur supérieur à 5 ou 10, quel que soit le type de géomembrane. Même si l'on a des géomembranes qui tiennent 20 à 30 ans sous ce type de climat (voir en particulier l'expérience acquise aux Canaries), le manque à gagner dû à l'immobilisation de ce type d'ouvrage pour un remplacement est énorme ;
- la protection supprime les problèmes de tenue au vent que rencontrent les géomembranes non protégées dans les grands ouvrages, nécessitant de nombreux ancrages, ce qui limite l'intérêt économique de la non protection. La réalisation de ces ancrages peut de surcroît perturber l'état de surface du support, ce qui induit un risque de poinçonnement. Leur réalisation, dans de bonnes conditions techniques, est donc lente et coûteuse ;
- la protection supprime les risques dus au vandalisme, tant humain qu'animal, ce que ne réussit aucune clôture (ni même un gardiennage).

3.3 Géomembrane PVC

Une géomembrane PVC de 1,5 mm d'épaisseur a été retenue pour :

- sa très haute résistance au poinçonnement, tant pendant la mise en œuvre de la protection granulaire que sous la pression de l'eau ;
 - son coefficient de frottement élevé (par comparaison avec d'autres matériaux), avec un angle de frottement de l'ordre de 26 degrés entre géomembrane et géotextile humide, ce qui est important pour la stabilité des protections sur grands talus ;
 - son coefficient de dilatation relativement réduit et sa large plage de soudabilité, ce qui facilite l'exécution du chantier dans un site où la température peut être élevée, mais où des contrastes de température importants sont aussi possible (au moins pour le bassin supérieur).
- Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques de la géomembrane ALKORPLAN 35053

Caractéristiques	Normes	Unités	Valeur nominale
Densité	DIN 53479	g/cm ³	1,24 ± 0,02
Epaisseur	EN 1849 - 2	mm	1.5 mm ± 5 %
Résistance en traction	ISO R 527	N/mm ²	L: ≥ 15 ; T: ≥ 15
Allongement à l'effort maximal	ISO R 527	%	L: ≥ 300 ; T: ≥ 300
Résistance à la déchirure	DIN 53363	N/mm	≥ 80
Dureté	DIN 53505	Shore A; 10 s	75 ± 2
Tenue au froid	DIN 53372	° C	- 20 ° C, pas de fissure
P	DIN 53361	° C	- 20 ° C, pas de fissure
Stabilité dimensionnelle	DIN 53377 6 heures/80°C	%	L: ≤ 2 T: ≤ 2

La géomembrane 35053 est dérivée d'une géomembrane 35054 certifiée ASQUAL, par réduction des agents de protection UV, inutiles pour une géomembrane protégée. Tous les autres critères sont respectés, en particulier ceux de l'annexe 10 du référentiel ASQUAL : absence de craie, K-wert > 70, allongement à la rupture minimal, stabilité dimensionnelle et mêmes caractéristiques mécaniques (Les délais ne permettaient pas de mettre en route en temps utile une certification ASQUAL pour la géomembrane 35053).

3.4 Géotextile

Les géotextiles placés en dessous et au dessus de la géomembrane sont identiques. Il a été retenu, en prédimensionnement, un géotextile Bidim P50, de 500 g/m², dont les caractéristiques sont données dans le tableau 3. Les planches d'essais ont confirmé que le complexe géotextile / géomembrane / géotextile était bien adapté pour résister aux sollicitations de ce chantier.

Tableau 3. Caractéristiques du géotextile mis en place sur chaque face de la géomembrane

Caractéristiques	Normes	Unités	Valeur
Résistance en traction	EN ISO 10319	kN/m	L, T \geq 30
Allongement à l'effort maximal	EN ISO 10319	%	L: \geq 85 ; T: \geq 75
Perforation dynamique (chute de cône)	EN 918	mm	10,5
Masse surfacique	EN 965	g/m ²	500
Épaisseur	EN 964-1 2kPa	mm	4.2
Résistance au poinçonnement CBR	EN ISO 12236	kN	5400

3.5 Drainage

Un drainage sous la géomembrane a été prévu au projet. Il a été maintenu dans la réalisation, malgré la grande perméabilité moyenne du site, même si les karsts ont été détectés et traités avec du béton. Aussi bien en fond de bassin que sur les talus, on rencontre des remblais calcaires, donc en principe perméables, avec présences de blocs, cailloux et graviers, mais aussi avec un certain pourcentage de fines et d'argiles de décalcification qui réduit localement la perméabilité.

Le drainage joue donc ici un rôle particulier par rapport aux ouvrages classiques, compte tenu de la perméabilité moyenne élevée des fondations et de l'absence de risques de venues d'eau de l'extérieur du site.

Son rôle, sur ce site, est essentiellement un rôle de sécurité en assurant une évacuation rapide et certaine d'une sous-pression engendrée par une fuite importante. Une telle sous-pression risquerait de ne pas être dissipée suffisamment vite par le support (fondations et digues), compte tenu de sa perméabilité non maîtrisée et des mouvements très rapides du plan d'eau.

Par contre, compte tenu de la valeur élevée de la perméabilité moyenne du fond, le réseau de drainage n'assurera que très partiellement le rôle de détection de fuite, ce rôle ne pouvant s'exercer, pour les fuites de faible importance, que si l'eau atteint l'un des collecteurs drainants, qui sont munis de cunettes non perforées. Par contre il jouera un rôle d'alarme pour les fuites les plus importantes.

Le drainage est constitué par une couche drainante en gravier de 0,20 m d'épaisseur, des collecteurs périphériques, un collecteur central, sensiblement dans l'axe du bassin, et des drains en arête de poisson.

3.6. Protection.

Compte tenu des disponibilités locales et des critères économiques, il a été retenu une protection par matériaux granulaires : sur le fond 0,30 m de gravier assez gros, sur talus 0,20 m de gravier moyen et 0,50 m d'enrochements (Tableau 5).

3.7. Planches d'essais

Le dispositif d'étanchéité a été finalisé après plusieurs planches d'essais, en particulier au démarrage du chantier du bassin supérieur, au démarrage du chantier du bassin inférieur et à chaque modification de granulométrie (dues à des petites variations dans l'approvisionnement). Les granulométries du support et de la protection, l'épaisseur des couches au dessus de la géomembrane et les caractéristiques des engins utilisés sont précisées pour chaque planche, dans le tableau 4.

3.7.1. Essais préliminaires

Les essais préliminaires ont été faits avant le démarrage de la mise en œuvre, sur faible pente (5/1), mise en œuvre en fond de bassin, mise en œuvre sur talus à 3/1 et vérification du risque de remontées de fines dans la couche drainante, en l'absence de géotextile sous celle-ci. L'essai préliminaire a permis de tester le comportement de la géomembrane, en épaisseur 1,2 et 1,5 mm, placée entre deux géotextiles de 500 g/m² prévus, avec les matériaux suivants placés, suivant toutes les combinaisons possibles, en couche drainante et en couche de protection de 20 cm :

- concassé 5/16,
- semi-concassé 5/16,
- semi-concassé 4/10.

La mise en place de la couche supérieure s'est faite à la pelle mécanique. Les différents engins de chantier ont ensuite circulé sur la couche supérieure de 0,20 m y compris le dumper Perlini 405 chargé d'un poids total de 50 tonnes, avec des pneus gonflés à 7 bars. (Photo 3). L'examen de la membrane après les essais (photo 4) n'a montré aucune marque de poinçonnement. Ce dumper est l'engin qui fera les approvisionnements de matériau sur le chantier, en particulier sur les fonds de bassins.

3.7.2. Essais de démarrage du bassin supérieur

Pour le fond, il a été vérifié la possibilité d'approvisionner les matériaux en circulant avec le dumper Perlini 405 sur une couche de 0,30 m de gravier semi concassé 16/32 (photo 9).

Sur talus, la mise en œuvre s'est faite à partir de la crête (malgré les réticences initiales des responsables de l'étanchéité) et non à partir du pied de talus, pour des raisons d'organisation du chantier de terrassement. La mise en place s'est faite avec une pelle mécanique (Hitachi EX 235, PTEC 23 tonnes) descendant les matériaux sur le talus. Les matériaux sont approvisionnés sur la crête et en tête de talus à l'aide du dumper (figure 5), avec beaucoup de précautions (début de déchargement avec la pelle, la benne ne déversant sur le haut de talus que lorsqu'une charge statique suffisante leste la membrane. La manœuvre de la benne est toujours lente). La pelle mécanique descend progressivement les matériaux (figures 6 et 7). Le même conducteur de pelle a été employé pour l'ensemble de la réalisation des talus à 3/1.

Après enlèvement de la couche de protection sur une surface de 4 à 6 m² (figures 4, 7 et 8) et ouverture du géotextile supérieur sur une surface d'au moins 1 m², les vérifications ont porté, en toutes zones, sur l'absence de toute marque de poinçonnement sur la géomembrane et donc toute diminution d'épaisseur, même minime, par examen visuel et prélèvement. Sur talus, il était en outre vérifié l'absence de mouvement et mise en tension dangereuse sur talus (figure 8).

Tableau 4. Caractéristiques des planches d'essai

Date de la planche d'essai	Granulométrie 1 Couche support	Granulométrie 2 Couche de protection	Epaisseur (en m) de la couche sur la géomembrane	Véhicule	Poids par roue (tonnes)	Contrainte (MPa) au niveau de la géomembrane ◆	Résultat	pente du talus H/V	Epaisseur de la géomembrane (mm)
12/06/2003 Essais préliminaires	4/10-R	5/16-C	0,2	1	10	0,48	OK	5/1	1,2
	5/16-R	5/16 C	0,2	1	10	0,48	OK	5/1	1,2
	5/16-R	5/16-C	0,2	1	10	0,48	OK	5/1	1,2
	5/16-C	5/16-C	0,2	1	10	0,48	OK	5/1	1,2
	5/16-C	5/16-C	0,7 ★★★	1	10	0,48	OK	5/1	1,2
22/11/2003 Démarrage du bassin supérieur	5/16-R	5/16-C	0,2	8			OK	3/1	1,5
	5/16-R	5/16-C	0,2	9			OK ★	3/1	1,5
	5/16-R	16/32-R	0,3	1		0,32	OK	0	1,5
19/01/2004	5/16-R	10/25-C	0,3	1	10	0,48	N	0	1,5
20/01/2004 variation de la granulométrie du fond bassin sup.	5/16-R	8/16-C	0,3	1	10	0,48	N ★★★	0	1,5
	5/16-R	8/16-C	0,3	4	6	0,19	OK	0	1,5
	5/16-R	8/16-C	0,2	2	2,8	0,24	OK	0	1,5
23/03/2004 idem	5/16-R	8/31,5-R	0,3	1	10	0,48	OK	0	1,5
15/4 2004 démarrage bassin inférieur	5/10-R	5/16-C	0,2	8		<,05	OK	43/1	1,5

Légende du tableau

R : matériaux roulés

C : matériaux concassés

OK : aucune marque de poinçonnement sur la géomembrane
 N : marques visibles de poinçonnement de profondeur $\geq 1/10$ mm

Caractéristiques des véhicules :

- 1 - Dumper 405, poids 48 tonnes, pression des pneus : 0,7 MPa
- 2 - Niveleuse, poids 17 tonnes, pression des pneus : 0,35 MPa
- 4 - Chargeur 554, poids par roue 6 tonnes, pression des pneus 0,4 MPa
- 8 - Pelle hydraulique Hitachi EX 235, poids 23,5 tonnes, pression sous les chenilles 0,05 MPa.
- 9 – Tracteur à chaîne Caterpillar D5

Légende des astérisques dans le tableau

★ Les tuiles des chenilles du tracteur D5 sont très hautes. Sur un talus à 3/1 et avec une couche de gravier de l'ordre de 10 cm, le gravier est poussé par les chenilles et se déplace sur les géosynthétiques. On observe une certaine abrasion du géotextile supérieur, mais la géomembrane est absolument intacte. Cette solution a été rejetée, à cause de la difficulté d'obtenir une couche d'épaisseur constante en cours d'installation et donc du risque d'une perforation accidentelle et passant inaperçue de l'étanchéité.

★★ Les marques de poinçonnement étaient très faibles : profondeur 1/10 à 2/10 mm. La solution a été rejetée.

★★★ Test préliminaire, 0,20m de gravier + 100/200 couche de 0,50 mm de galets 100/200

◆ La contrainte au niveau de la géomembrane est déterminée par la méthode de Boussinesq.

Après les premiers essais, la structure indiquée dans le tableau 5 a été retenue, du bas vers le haut.

Tableau 5. Structure du dispositif d'étanchéité

	Fond	Talus
Enrochement	—————	100/200 concassé
Couche de confinement	16/32 semi-concassé 0,30 m	5/16 concassé 0,20 m
Géotextile antipoinçonnant	Géotextile P 50 500g/m	Géotextile P 50 500g/m
Géomembrane	PVC 35053 1,5 mm	PVC 35053 1,5 mm
Géotextile antipoinçonnant	Géotextile P 50 500g/m ²	Géotextile P 50 500g/m ²
Couche support drainante	5/16 semi concassé 0,20 m	5/16 semi concassé 0,20 m
Fond de forme	Fond de terrassement réglé et compacté	Fond de terrassement réglé et compacté



Figure 3. Planche préliminaire. Le dumper circule sur 0,20 m de gravier 5/16, sur un complexe formé par un géotextile, une géomembrane PVC 1,2 mm et un géotextile posée sur une couche de 5/20

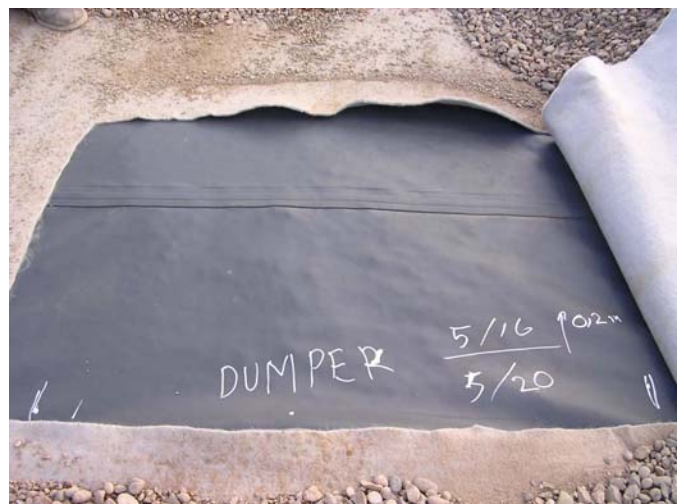


Figure 4. Examen de la géomembrane après passage du dumper. Aucune trace de poinçonnement n'est visible, sur aucune des faces.



Figures 5 et 6. Planche du 22/11/2003 – mise en place sur talus d'une couche de transition de 0,20 m après réglage de gravier 5/16 concassé. Le support est un 5/16 roulé.

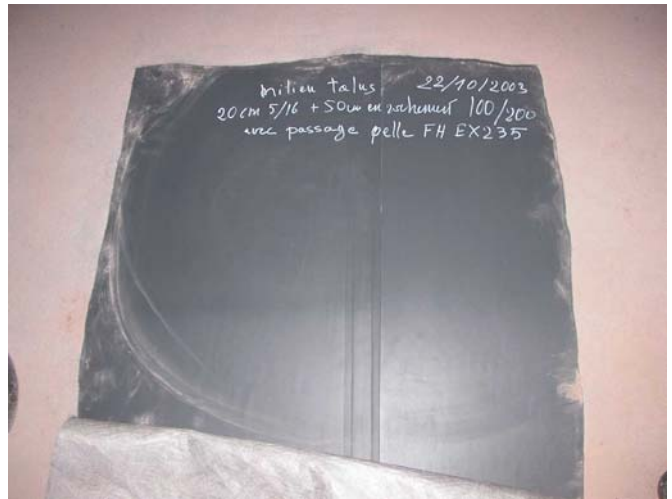


Figure 7. Planche du 22/11/2003 - dégagement de la géomembrane après mise en place de la couche d'enrochements à la pelle mécanique.

Figure 8. Planche du 22/11/2003 – aspect de la géomembrane sur talus après dégagement. aucune marque de poinçonnement.



Figure 9. Planche du 22/11/2003. Mise en place sur le fond (gravier roulé 16/32). Solution retenue, ainsi que l'emploi de chargeur à pneu et de niveleuse

Figure 10. Planche du 22/11/2003. Le tracteur est trop lent sur le fond et ses roues risquent d'être agressives sur talus en cas de sous-épaisseur.



Figure 11. Planche d'essai lors d'une modification de granulométrie sur le fond (janvier et mars 2004). 80 passages avant examen



Figure 12. Mise en œuvre de la couche de confinement sur le bassin inférieur; dumper et chargeur sur le fond, pelle mécanique sur talus

Les essais de janvier et mars 2004 confirment que les granulats roulés (ici 16/32) ont une agressivité légèrement moindre que des agrégats concassés de dimension moitié (ici 8/16), ce qui confirme d'anciens résultats de laboratoire et de chantier. (Fayoux, 1990)

4. Exécution des travaux

L'exécution des travaux a été décrite de façon détaillée dans la revue Travaux (Fayoux et al., 2005). En ce qui concerne les géosynthétiques, nous soulignons simplement les précisions suivantes.

Les géotextiles inférieurs sont assemblés par recouvrement minimal de 0,30 m. Les géotextiles supérieurs sont assemblés par couture (Avantages : recouvrement moindre : 0,10 m. et garantie de la continuité du géotextile avant et pendant la mise en place de la protection). Le délai avant mise en place de la protection, normalement prévu de 2 à 3 jours, a été parfois supérieur à un mois, par suite de difficultés d'approvisionnement de matériaux de protection. La couture a permis de garantir que le géotextile ne se soulève pas sous l'action du vent. Lors de la mise en place de la couche de protection, la couture garantit qu'aucun gravier ne puisse se glisser entre géotextile et géomembrane.

La géomembrane PVC est livrée en rouleaux de 2,05 m par 125 m, sans préfabrication préliminaire, pour des raisons douanières. Il n'y a pas eu de préfabrication sur place, celle-ci augmentant les manipulations, sans améliorer le rythme du chantier, relativement peu perturbé par les intempéries, et dont la cadence était limitée par les possibilités d'approvisionnement en matériaux de protection.

Les géomembranes étaient assemblées par soudage à l'aide de 2 à 3 machines automatiques avançant simultanément sur 2 ou 3 assemblages différents (Doublés soudures avec canal de contrôle; géomembrane chanfreinée au niveau des points triples; points triples soudés dans la foulée par les soudeuses automatiques et confirmés par patch). Les points particuliers sont soudés manuellement à l'air chaud. L'exécution de tous les détails a été strictement définie par des procédures de pose.

Les travaux se sont étagés entre 2001 et 2004. La pose de l'étanchéité du bassin supérieur s'est faite entre fin octobre 2003 début juin 2004 et celle du bassin inférieur entre début avril et fin août 2004, la cadence ayant été déterminée par les capacités de fourniture des matériaux de drainage et de protection. La mise en service s'est faite début 2005

5. Références bibliographiques

- Fayoux D., Dewalque N. (2005). Étanchéité par géomembrane PVC des bassins de la STEP d'Afourer (Maroc). *Revue Travaux*, n°817, mars 2005.
- Fayoux D. (1990). Durability of PVC geomembranes and resistance to puncturing. *Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol. 2, The Hague, Holland, June, pp. 561-565.