

# UN CANAL ÉTANCHE PAR GÉOMEMBRANE PVC : LE CANAL DE TEKAPO EN NOUVELLE-ZÉLANDE

## A CANAL WATERPROOFED WITH A PVC GEOMEMBRANE : TEKAPO CANAL IN NEW ZEALAND

Alberto SCUERO<sup>1</sup>, Gabriella VASCHETTI<sup>1</sup>, John COWLAND<sup>2</sup>, John Jeremy ELDRIDGE<sup>3</sup>, Jean-Pierre GIROUD<sup>4</sup>

1 Carpi Tech, Balerna, Suisse

2 Carpi Asia Pacific, Hong Kong, Chine

3 Consultant, Auckland, Nouvelle-Zélande

4 Consultant, Paris, France

**RÉSUMÉ** – Le canal hydroélectrique de Tekapo en Nouvelle Zélande, long de 25,3 km, a un débit de 130 m<sup>3</sup> / s, une vitesse d'écoulement de 1,2 à 1,6 m / s, une profondeur d'eau de 5,3 à 6,4 m, et une largeur de 33 à 37 m. Des fuites et des signes d'érosion du revêtement en terre compactée ont nécessité un nouveau revêtement. Les exigences très strictes en termes d'étanchéité, résistance aux séismes, durée de vie, durée des travaux, minimisation de la maintenance, ont amené à choisir un revêtement en géomembrane PVC, partiellement exposée. Les travaux de réhabilitation sur 7,54 km ont été achevés en deux campagnes de 12 semaines chacune. L'article décrit le choix de la solution, la conception et l'installation du système, et le comportement depuis la mise en service du canal.

Mots-clés : Etanchéité, géomembranes, canaux, résistance sismique, sous-pressions.

**ABSTRACT** – The 25.3 km long Tekapo hydropower canal in New Zealand has a 130 m<sup>3</sup>/s flow capacity, 1.2 to 1.6 m/s flow velocity, 5.3 to 6.4 m water depth, and 33 to 37 m width. The canal exhibited leaks and signs of erosion of the compacted earth lining, which required lining rehabilitation. The very strict requirements in terms of watertightness, resistance to earthquakes, service life, duration of works, and minimisation of maintenance, led the owner to choose a PVC geomembrane liner, partially exposed. The rehabilitation works on 7.54 km were completed in two campaigns of 12 weeks each. The paper describes the selection of the solution, the design and installation of the system, and the behaviour after the canal was put back in operation.

Keywords: Watertightness, geomembranes, canals, seismic resistance, uplifts.

## 1. Introduction

Le canal de Tekapo a pour fonction le transfert de l'eau sur une longueur de 25,3 km, de l'usine de Tekapo A, au bord du lac Tekapo, vers le bassin de mise en charge de l'usine de Tekapo B, qui se déverse dans le lac Pukaki dans l'île Sud de la Nouvelle-Zélande. Le canal a un débit de 130 m<sup>3</sup> / s et une vitesse d'écoulement de 1,2 à 1,6 m / s. La profondeur de l'eau varie de 5,3 à 6,4 m, pour une largeur en partie supérieure variant de 33 à 37 m. La section transversale du canal varie le long du canal pour maintenir le débit souhaité. Certains tronçons du canal sont en déblai, d'autres en remblai. Les talus ont une pente de 1V : 2H ou 1V : 2,5 H selon les sections ; la pente longitudinale est d'environ 1/8500.

Depuis sa construction de 1973 à 1977, le canal a comme étanchéité un revêtement compacté de gravier limoneux provenant de dépôts de till glaciaire. Ce revêtement a une épaisseur de 0,8 m sur le fond et 3 m de largeur (mesurée horizontalement) sur les talus.

Peu de temps après la mise en service du canal, des suintements persistants sont apparus presque à mi-longueur du canal. En 2008, d'autres infiltrations ont été identifiées, plus en amont, autour d'une galerie sous le canal, à 8,17 km en aval de l'usine Tekapo A. Des fuites à travers le revêtement en terre à deux endroits ont été identifiées et ensuite surveillées par des inspections en plongée. Ces inspections ont indiqué qu'il y avait un phénomène actif d'érosion interne à travers le revêtement en terre et les remblais sous-jacents. Des réparations ponctuelles des défauts identifiés ont été effectuées afin de gagner le temps nécessaire pour planifier une réhabilitation viable à long terme dans trois tronçons spécifiques du canal. Un objectif majeur de la réhabilitation était d'améliorer le comportement

du canal en cas d'activité sismique de manière à assurer la viabilité future de l'aménagement hydraulique.

## 2. Conception de la solution

Du fait de la présence de fuites et du risque d'érosion interne (en fait, des dolines s'étaient déjà développées et devaient être rebouchées) dans trois tronçons du canal, en particulier en cas d'activité sismique, il fut convenu qu'un revêtement étanche supplémentaire était nécessaire au-dessus du revêtement en terre dans ces trois tronçons.

### 2.1. Exigences

Pour garantir l'étanchéité en présence des phénomènes (formation de fissures, tassements) qui peuvent affecter le revêtement existant en cas d'activité sismique, un matériau ayant la capacité de se déformer tout en restant étanche était nécessaire. Les matériaux de revêtement traditionnels tels qu'argile compactée, béton de ciment, béton bitumineux, n'ont pas les caractéristiques de déformabilité nécessaires, et le béton de ciment en outre n'était pas acceptable car il aurait augmenté le pH de l'eau, ce qui aurait été préjudiciable aux fermes piscicoles et à l'habitat des poissons dans le canal. À cela il faut ajouter des exigences à long terme : le maître d'ouvrage souhaitait que la solution adoptée ne nécessite qu'une maintenance limitée, que la durée de vie soit de 50 ans, et que la solution adoptée ait un degré de fiabilité élevé.

Compte tenu de la nécessité de fermer les usines Tekapo A et B pour mettre le canal hors service pendant les travaux de réhabilitation du revêtement, et de la perte de production d'électricité qui en aurait résulté, il était nécessaire d'effectuer les travaux de revêtement dans les délais les plus brefs. La rapidité d'installation était donc à prendre en compte comme élément crucial dans le choix de la solution.

### 2.2. Solutions considérées et conception finale

Les solutions retenues dans une première phase d'évaluation ont été deux solutions avec géomembranes : une solution avec une géomembrane homogène en polyéthylène haute densité (PEHD) de 2 mm d'épaisseur, et une solution avec une géomembrane composée constituée d'une géomembrane en chlorure de polyvinyle (PVC) de 2,5 mm d'épaisseur thermo-associée à un géotextile non-tissé aiguilleté de 500 g/m<sup>2</sup> de masse surfacique.

#### 2.2.1. Choix du type de géomembrane

Les détails de l'analyse qui amena au choix du type de géomembrane ne sont pas l'objet de cet article. Un résumé de l'analyse a été publié (Giroud et al., 2013). Des études comparatives sur les deux types de géomembrane ont été menées par le maître d'ouvrage et ses consultants, les paramètres considérés étant la capacité du matériau à (1) résister à l'ouverture de fissures dans le revêtement existant, (2) s'adapter à la présence de grosses pierres et autres irrégularités dans la couche de support, (3) résister à un tassement différentiel au niveau des connexions avec les structures en béton, et (4) s'adapter au mieux au support avec un minimum de plis. Du point de vue pratique, la géomembrane PEHD présentait l'avantage d'un coût inférieur, tandis que la géomembrane composée PVC était le seul matériau ayant une grande expérience en applications hydrauliques sophistiquées.

L'analyse concernant la résistance à l'ouverture de fissure en cas d'activité sismique, la plus importante condition du point de vue de la fiabilité de la géomembrane, a été faite en considérant les deux mécanismes qui induisent une contrainte de traction et une déformation dans la géomembrane : le développement d'une fissure dans le matériau supportant la géomembrane et la déflexion de la géomembrane sur la fissure sous la pression appliquée par l'eau. Deux niveaux d'activité sismique ont été considérés sur la base des données sismiques du site, se traduisant par deux largeurs de fissures : 30 mm (niveau de service) et 80 mm (niveau de sécurité). L'analyse a été basée sur le concept de la co-énergie (Giroud & Soderman, 1995 ; Giroud, 2005). Pour chaque cas, plusieurs coefficients de sécurité ont été obtenus en considérant différentes valeurs des paramètres suivants : frottement, présence de soudures, direction de la fissure. Les coefficients de sécurité (CS) suivants ont été obtenus (Giroud et al., 2013) :

- Pour une largeur de fissure de 30 mm : coefficient de sécurité de la géomembrane composée PVC = de 3,64 à 4,70 ; coefficient de sécurité de la géomembrane PEHD = de 1,06 à 1,45.

- Pour une largeur de fissure de 80 mm : coefficient de sécurité de la géomembrane composée PVC = de 2,32 à 2,98 ; coefficient de sécurité de la géomembrane PEHD inférieur à 1.

Compte tenu des coefficients de sécurité insuffisants de la géomembrane PEHD, la géomembrane composée PVC a été choisie.

### 2.2.2. Système d'ancrage ou lestage

Une géomembrane dans un canal doit être ancrée ou lestée pour résister aux forces de frottement exercées par l'eau qui s'écoule au-dessus d'elle, et aux forces de soulèvement exercées par l'eau qui serait présente sous la géomembrane à cause d'une fuite. Pour le canal de Tekapo, le maître d'ouvrage souhaitait éviter de creuser des ancrages dans le revêtement en terre existant et protéger la géomembrane de la chaleur et des rayons ultraviolets dans la partie supérieure des talus, tout en maintenant au moins le débit existant. Un objectif additionnel était que le nouveau revêtement offre, comme le revêtement existant, la possibilité aux hommes et animaux tombés dans le canal de s'en échapper.

La solution choisie a été de lester la géomembrane dans la partie supérieure des talus et sur le fond, et de la laisser exposée en partie moyenne et inférieure des talus. Ce lestage partiel permet : (1) de résister aux forces de frottement et de soulèvement exercées par l'eau ; (2) d'avoir une partie de la géomembrane au contact de l'eau pour assurer le débit spécifié grâce à la basse rugosité hydraulique de la géomembrane ; (3) de protéger la géomembrane en partie supérieure des talus ; et (4) de permettre aux hommes et animaux de sortir du canal.

Plusieurs configurations et matériaux de lestage (blocs de béton articulés, graviers en couche d'épaisseur uniforme et non uniforme, gabions) furent considérées dans l'analyse et les calculs pour le système de lestage (Giroud et al., 2013). Les tensions, déformations et déplacements de la géomembrane ont été analysés dans tous les cas, le cas critique étant celui du soulèvement de la géomembrane par de l'eau qui se serait accumulée sous la géomembrane. Pour toutes les configurations et matériaux évalués, une évaluation hydraulique a été effectuée pour vérifier que le débit spécifié était assuré.

Le lestage a été conçu de manière à être stable en cas d'activité sismique et de soulèvement de la géomembrane. Cependant, le soulèvement de la géomembrane et l'activité sismique n'ont pas été supposés se produire en même temps. En effet, le cas extrême d'un tablier de pont tombant dans le canal lors d'un tremblement de terre exigerait des réparations importantes, bien au-delà des inconvénients du soulèvement de la géomembrane. Des analyses de stabilité ont été menées pour tous les types de matériaux de lestage. Ces analyses ont abouti au dimensionnement du lestage (Giroud et al., 2013). Sur la base du coût, de la facilité et la rapidité de construction, un lestage par graviers a été choisi pour le fond du canal et la partie supérieure des talus, comme schématisé en Fig. 1.

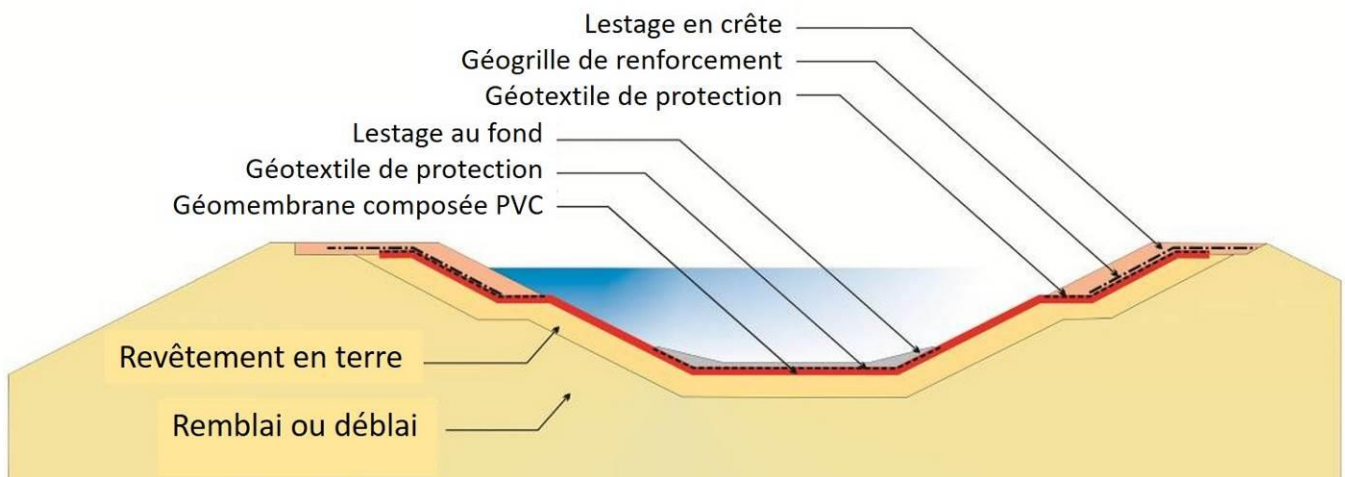


Figure 1. Coupe de la solution choisie.

Les composants du système d'étanchéité (Figure 1), à partir du revêtement existant en terre compactée, sont :

- le revêtement étanche, SIBELON® CNT 3750, une géomembrane composée constituée d'une géomembrane PVC de 2,5 mm d'épaisseur, plastifiée avec des plastifiants ramifiés de haut poids

moléculaire et thermo-associée à un géotextile polyester non-tissé aiguilleté à fibres discontinues de 500 g / m<sup>2</sup> de masse surfacique ;

- un géotextile polyester non-tissé aiguilleté à fibres discontinues pour protéger la géomembrane d'étanchéité des dommages lors de la mise en place du lestage en graviers. Ce géotextile a une masse surfacique de 2000 g / m<sup>2</sup> sur le fond du canal et de 1000 g / m<sup>2</sup> en partie supérieure des talus ;

- une géogrille pour assurer la stabilité du lestage en partie supérieure des talus. En effet, des essais de frottement ont indiqué que l'interface géomembrane / géotextile constituait l'interface critique au glissement, et l'analyse de stabilité a indiqué la nécessité d'un renforcement avec une géogrille d'une résistance en traction de 35 kN / m mise en place sur une couche de gravier de granulométrie appropriée pour assurer son imbrication avec la géogrille ;

- une couche de graviers de délavage glaciaire, d'origine locale, de 300 mm d'épaisseur, pour former le lestage sur le fond et en partie supérieure des talus. La couche de lestage sur le fond est étendue latéralement de manière à former un contrefort au pied de chacun des deux talus.

### **2.3. Activités pré construction**

Pour atteindre les objectifs du projet, il a été décidé d'impliquer très en amont les parties concernées. Ce processus commença près d'un an avant le début de la construction, avec une conception coordonnée maître d'ouvrage / concepteur / entrepreneur, suivie par de nombreux essais en vraie grandeur réalisés sur le terrain quelques mois avant le démarrage des travaux, afin d'optimiser la solution technique et les procédures d'installation et d'assurance de qualité. Cette approche était nécessaire en vue des courts délais prévus pour l'exécution des travaux car le maître d'ouvrage prévoyait d'exécuter les travaux à l'intérieur du canal sur deux saisons : en 2013 sur une longueur d'environ 5,7 km de canal divisé en deux tronçons, entraînant une coupure d'électricité de 14 semaines ; en 2014 sur une longueur d'environ 1,8 km en un seul tronçon, pendant de 14 semaines. Un article publié par certains des auteurs de cet article donne les détails des essais en vraie grandeur (Campbell et al., 2014). Une brève description de ces essais est présentée ci-dessous.

Un premier essai avait pour but de fournir une première évaluation des méthodes de mise en place du lestage sur le fond. Cet essai a été mené dans une ancienne carrière près de Christchurch. La couche de support a été préparée en utilisant un matériau similaire à celui de la zone du canal de Tekapo et compacté avec un rouleau statique. Les composants géosynthétiques (géomembrane composée et géotextile de protection) et la couche de lestage ont été placés sur le support et compactés avec 20 passes d'une excavatrice de 20 tonnes. Les géosynthétiques ont ensuite été soigneusement exhumés à la main. Le bon état de la géomembrane composée exhumée fournit à ce stade précoce un degré élevé de confiance que le système d'étanchéité répondrait aux exigences de performance.

Un essai pour prouver la méthodologie de mise en place de l'ensemble du système, y compris le lestage sur le fond et les talus, a ensuite été réalisé près du canal dans une fosse excavée pour reproduire la section transversale du canal. L'installation de l'essai était conforme au guide GS11 de l'Institut de Recherche des Géosynthétiques (GRI) sur la construction de planches d'essai visant à évaluer les matériaux de protection destinés à éviter la perforation des géomembranes (GRI, 2012). Comme les graviers obtenus localement avaient une propension à se fissurer sous charge, huit gros cailloux ont été fendus et placés avec leurs arêtes vives directement sur le géotextile de protection avant de placer le lestage. Ces cailloux anguleux ont été exhumés après 210 passages de l'excavatrice, et aucun dommage à la géomembrane n'a été détecté. L'essai de mise en place du lestage, en plus d'avoir démontré la stabilité du lestage sur les talus, a permis de tester les techniques, les procédés d'assurance de qualité et les équipements, et donc a été utilisé comme modèle pour les travaux de réhabilitation du canal.

Deux mois avant le démarrage des travaux, la carrière a été de nouveau utilisée pour les essais de construction des batardeaux, ayant pour but de vérifier que les batardeaux pourraient être construits et enlevés dans les délais programmés pour minimiser la période de fermeture du canal. Les batardeaux consistaient en un remblai de terre conventionnel avec faible teneur en fines pour minimiser la quantité de solides en suspension dans l'eau, avec une géomembrane sur la face amont pour minimiser les infiltrations à travers les batardeaux et leur contournement par l'eau.

### **3. Construction et assurance de qualité**

#### **3.1. Planification et mise en œuvre de l'assurance de qualité lors de la construction**

Un manuel de gestion de la qualité a été produit avant les travaux afin de définir les procédures requises pour l'assurance de qualité lors de la construction. Le manuel prescrivait chaque phase de travaux qui devait être inspectée, vérifiée pour sa conformité et puis approuvée, ainsi que l'acceptation contractuelle des phases de travaux achevées pour permettre le début des phases suivantes. Une planification détaillée des activités liées à l'assurance de qualité a été préparée. Le planning de qualité a été coordonné avec le planning global des travaux, et un planning journalier a été produit pour chaque activité du personnel d'assurance de qualité et des inspecteurs. Cette planification détaillée a assuré que toutes les inspections ont été effectuées en temps voulu, sans causer de retard ou de perturbation aux travaux. Toutes les activités d'assurance de qualité essentielles à la performance à long terme du système d'étanchéité ont été documentées dans des formulaires d'assurance de qualité.

Au total 16 personnes ont été affectées à plein temps à l'assurance de qualité lors de la construction : 4 inspecteurs pour l'acceptation de la surface, 6 inspecteurs pour l'installation de la géomembrane et les essais des soudures, 1 inspecteur pour les ancrages de la géomembrane, 3 inspecteurs pour vérifier l'intégrité de la géomembrane pendant la mise en place du lestage, et 2 ingénieurs pour remplir les formulaires requis pour chaque activité. De plus, un ingénieur sénior a supervisé le système de qualité. Chaque jour, les formulaires d'assurance de qualité ont été rassemblés dans un dossier électronique et envoyés au maître d'œuvre pour approbation dans le cadre des procédures contractuelles d'acceptation des travaux. Tous les formulaires ont été signés par un représentant du maître d'œuvre et un représentant de l'entrepreneur. En règle générale, chaque jour de construction du système d'étanchéité, 25 formulaires ont été remplis, vérifiés et approuvés. Au moment de l'achèvement des deux premiers tronçons réhabilités, environ 1.500 formulaires d'assurance de qualité avaient été enregistrés dans le système de qualité, et ceux-ci faisaient partie des documents contractuels pour la réception finale des travaux.

#### **3.2. Fourniture des matériaux**

Pour minimiser le risque de retard dans les travaux, les matériaux ont été fabriqués et livrés sur site avant le début des travaux. Pour minimiser les risques d'approvisionnement, la géomembrane composée a été fabriquée dans deux usines différentes, une en Italie et une en Espagne.

L'assurance de qualité à la fabrication a compris des essais standard en usine (épaisseur, densité, résistance et allongement en traction, résistance à la déchirure, résistance à la perforation, flexibilité à basse température, stabilité dimensionnelle et résistance à la pression hydrostatique), suivis par la collecte d'échantillons chez chaque fabricant pour un stockage à long terme en vue d'essais éventuels en cas de litige. Un système d'identification a été mis en place pour chaque rouleau et lot afin que les résultats des essais puissent être comparés aux caractéristiques des rouleaux spécifiques placés dans le canal. Trois organismes indépendants distincts ont été impliqués dans le processus d'assurance de qualité de la géomembrane composée : l'un a effectué des inspections dans les usines pour vérifier les systèmes de contrôle de qualité des fabricants et pour documenter et établir la compatibilité des systèmes de contrôle de qualité entre les deux usines, un deuxième a collecté les échantillons pour les essais de conformité, et un troisième a testé la conformité des géomembranes composées aux spécifications. Des échantillons supplémentaires ont été prélevés pour des essais de vérification indépendants effectués sous la responsabilité du maître d'ouvrage. Ces essais de vérification comprennent notamment des essais de durabilité à long terme, qui dépassent les exigences de conformité contractuelle par le fournisseur.

#### **3.3. Mise hors service temporaire du canal**

En l'absence d'information sur une précédente mise hors service du canal, une analyse détaillée, étayée par des précédents de construction sur d'autres canaux, a été effectuée pour développer une stratégie de mise hors service temporaire du canal en minimisant le risque d'instabilité des talus à la suite d'un assèchement trop rapide et, en même temps, maximisant le temps disponible pour les travaux.

Des batardeaux ont été construits aux extrémités de chacun des tronçons à étancher. Ces batardeaux ont été construits en deux phases. La Phase 1 (Figure 2 à gauche) comprenait la mise en place de graviers jusqu'à 0,5 m au-dessus du niveau de l'eau avec une largeur de crête de 4 m, suivie

par la mise en place d'une couche de filtre granulaire le long du pied amont du batardeau, et la mise en place de la géomembrane en amont du batardeau à l'aide de grues et de plongeurs. Une fois cette phase terminée, l'assèchement du canal commença. La Phase 2 comprenait l'élargissement de la crête et de la recharge en aval des batardeaux pour permettre aux engins lourds de traverser le canal sur les batardeaux, et pour élever les batardeaux à leur niveau final. De grands sacs de sable ont été placés de chaque côté de la crête et la géomembrane a été étendue sur les sacs de sable. Au pied en aval des batardeaux, un puisard a été formé avec des sacs de sable pour recueillir et contenir les eaux contournant le batardeau. Une pompe submersible dans le puisard avait pour but de permettre aux eaux ainsi recueillies d'être recyclées dans le canal. En fait, les batardeaux se sont avérés très efficaces et les eaux recueillies dans le puisard étaient rarement, voire jamais, suffisantes pour faire fonctionner les pompes. L'assèchement de chaque tronçon a été réalisé comme prévu en environ quatre jours, dont une journée réservée à la récupération et au déplacement des poissons dans le canal.

Avant les travaux de réhabilitation, les possibilités d'inspecter le canal pour évaluer l'état du revêtement existant étaient limitées. Une série d'inspections en plongée a donc été entreprise lors de la phase de conception pour évaluer l'état général du revêtement existant et établir les objectifs des travaux de préparation de la surface (irrégularités acceptables pour minimiser les tensions induites dans la géomembrane, stabilité).

### 3.4. Préparation de la surface

La préparation de la surface a compris les opérations suivantes : enlèvement de la couche de protection contre le gel des parties supérieures des talus ; élimination des algues, des débris et des matériaux humides, mous ou instables ; profilage de la surface du revêtement existant pour éliminer les irrégularités inacceptables et son inspection pour détecter éventuels défauts, suivie par deux passes d'un rouleau à tambour lisse de 3,5 t pour identifier les zones molles ou compressibles. Le traitement de surface a été effectué en fonction des résultats des passes du rouleau. En général, la surface a été préparée par la mise en place d'une couche de 50 mm d'épaisseur nominale de graviers de délavage glaciaire de 20 mm (couche au milieu de la Figure 2 à droite). La couche de protection contre le gel a été stockée pour être éventuellement réutilisée.



Figure 2. Construction du batardeau (Phase 1), et préparation de surface : procédant du premier plan à l'arrière-plan, la surface profilée, le traitement de surface, et la surface du canal après assèchement.

Toutes les surfaces sur lesquelles la géomembrane composée devait être installée ont été inspectées, vérifiées pour les tolérances énoncées dans le manuel de gestion de la qualité, et acceptées si elles étaient conformes. Toutes les non-conformités ont été corrigées selon les procédures établies.

### 3.5. Installation de la géomembrane composée

L'acceptation de surface a été immédiatement suivie par l'installation de la géomembrane composée. Avant l'installation, tous les composants du système d'étanchéité ont été vérifiés sur place pour leur intégrité et leur conformité aux spécifications et aux quantités, comme exigé par les procédures du manuel de gestion de la qualité. Seuls les matériaux acceptés ont été installés.

Les lés de géomembrane composée, d'une largeur de 2,05 m, ont été déroulés à partir de la crête. Les lés adjacents ont été thermo-soudés. Les procédures d'inspection, d'essai et d'acceptation de l'installation de la géomembrane composée et de toutes les soudures ont été celles imposées par le manuel de gestion de la qualité. Ces procédures ont permis de vérifier la continuité et l'intégrité de chaque lé, les chevauchements entre lés, le processus de soudure, et la continuité et l'étanchéité des soudures. Le manuel fournissait également des procédures pour la réparation de tout défaut constaté.



Figure 3. Déroulage des lés de géomembrane composée, et soudure des lés adjacents. En arrière-plan, mise en place du lestage sur la géomembrane composée.

### 3.6. Ancrages périphériques

Aux extrémités de chaque tronçon étanché, et aux raccordements avec toutes les structures (ponts, prises d'eau, etc.) interceptant la géomembrane composée, un ancrage étanche a été installé pour éviter le contournement du système d'étanchéité par l'eau du canal. Les ancrages transversaux aux extrémités des tronçons réhabilités sont des tranchées excavées dans le revêtement existant et remblayées avec du béton plastique (Fig. 4 à gauche). Les ancrages sur les structures rigides sont du type mécanique, avec profilés plats en acier inoxydable comprimant la géomembrane sur le béton (Figure 4 à droite), après que le géotextile faisant partie de la géomembrane composée ait été enlevé dans la zone ancrée pour assurer l'étanchéité du raccordement. Le manuel de gestion de la qualité comprenait les procédures de vérification du système d'étanchéité aux extrémités de chaque tronçon, et de vérification des raccordements étanches aux structures en béton.



Figure 4. À gauche, ancrage transversal en tranchée. À droite, détail d'ancrage sur structure en béton. Ce type d'ancrage est à même de résister à l'eau en pression.

### 3.7. Mise en place du lestage

Les couches de lestage et d'imbrication nécessitaient des matériaux granulaires provenant de zones d'emprunt locales et calibrés par criblage. Le lestage sur le fond est constitué d'une couche de 300 mm de graviers de délavage glaciaire de 20 mm à 200 mm. Les mêmes graviers ont été utilisés pour former

les contreforts au pied des talus. Les graviers ont été placés au moyen d'un système de convoyage spécialement conçu (Fig. 5 à gauche) sur le géotextile de protection de 2000 g / m<sup>2</sup> placé au-dessus de la géomembrane composée. En partie supérieure des talus, une couche de 100 mm d'épaisseur de gravier fin (20 mm de diamètre maximum) a été mise en œuvre sur le géotextile de protection, ce gravier constituant une couche d'imbrication en s'encastant dans les ouvertures de la géogrille située au-dessus. La couche de lestage en graviers a été mise en œuvre sur la géogrille avec une pelle mécanique (Fig. 5 à droite).

Les activités d'installation ont été effectuées en séquence, de sorte que l'installation de la géomembrane composée à un endroit a été immédiatement suivie par l'inspection finale de la géomembrane composée faite par les inspecteurs d'assurance de qualité. Après vérification visuelle de la mise en place des couches de protection, d'imbrication et de renforcement, les inspecteurs ont surveillé en permanence la livraison et la mise en place des graviers sur le fond et sur la partie supérieure des talus. Les inspecteurs avaient le pouvoir d'arrêter les travaux s'ils soupçonnaient que des dommages avaient pu être causés à la géomembrane, et d'exiger une exhumation à la main pour en vérifier l'intégrité et, le cas échéant, en exiger la réparation.



Figure 5. Mise en place de la couche de lestage au-dessus du géotextile de protection sur le fond, et sur la partie supérieure des talus : au premier plan la géogrille placée sur du gravier fin et le géotextile de protection, à l'arrière-plan les graviers sont mis en place au-dessus de la géogrille.

### 3.8. Déroulement des travaux

Les travaux de réhabilitation, pour un total d'environ 358.000 m<sup>2</sup> de surface revêtue, furent exécutés en deux campagnes distinctes de 12 semaines chacune (au lieu des deux campagnes de 14 semaines prévues), y compris le temps nécessaire pour construire les batardeaux, assécher le canal, collecter et enlever les poissons, et enlever les batardeaux à la fin des travaux.



Figure 6. Les équipes lors de campagnes de 2013 (à gauche) et 2014 (à droite), toutes deux terminées deux semaines à l'avance.

## 4. Conclusions

La décision d'impliquer très en amont les parties concernées (maître d'ouvrage / concepteur / entrepreneur), dès la phase de conception et bien avant le début de la construction, a permis de respecter les délais prévus et, en fait, de remettre le canal en opération en avance sur le programme, tout en réalisant un système d'étanchéité conçu et installé selon les règles de l'art.



Le maître d'ouvrage surveille le processus de vieillissement de la géomembrane composée via des essais réalisés sur des échantillons prélevés dans le canal. Le laboratoire indépendant, spécialisé en recherche et assurance qualité, qui avait effectué les essais de référence et de contrôle en usine à l'époque de la fabrication de la géomembrane composée, a effectué les mêmes essais sur les échantillons prélevés dans le canal. Les résultats des essais sur les échantillons retirés du canal après être restés immergés pendant les 5 premières années en service montrent que la géomembrane composée se comporte comme prévu.

En ce qui concerne la performance du système d'étanchéité dans son ensemble, il n'y a pas eu de comportement inattendu depuis la remise en service du canal en 2014 et, sur la base des performances de la même géomembrane composée dans des applications similaires, une bonne performance à long terme est à prévoir pour la réhabilitation du Canal de Tekapo.



Figure 7. Le canal de Tekapo de nouveau en opération.

#### 4. Références bibliographiques

- Campbell M., Eldridge J., Scuero A, Vaschetti G., Cowland J., Wilkes J. (2014). Installation of a PVC geomembrane liner for the Tekapo canal remediation. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Water Res. and Hydrop. Develop. in Asia*.
- Giroud J.P. (2005). Quantification of geosynthetics behavior", *Geosynthetics International, Spec. Iss. on Giroud Lectures*, Vol. 12, No. 1, 2-27.
- Giroud J.P., Jacka N., Dann C., Eldridge J.J. (2013). Hydropower canal geomembrane liner analytical techniques. *Proc. NZSOLD/ANCOLD Conf. on Multiple Use of Dams and Reservoirs*.
- Giroud J.P., Soderman K.L. (1995). Design of structures connected to geomembranes, *Geosynthetics International*, Vol. 2, No. 2, 379-428.
- GRI (2012). *Constructing test pads to assess protection materials intended to avoid geomembrane puncture*. GRI Guide GS 11, Geosynthetic Institute, Folsom, USA, 7 pages.

