

PRÉSENTATION DU BASSIN DE DÉCANTATION À ÉTANCHÉITÉ PVC SUR LE SITE MINIER DU SALAR DE ATACAMA AU CHILI

EVAPORATION POND IN SALAR DE ATACAMA LINED WITH PVC GEOMEMBRANE

André ROLLIN
Consultant, Montréal, Canada

RÉSUMÉ - Les applications minières représentent un marché de plus en plus ouvert pour les géosynthétiques, que ce soit en étanchéité de réservoirs, en couvertures de talus, dans les aires de lixiviation ou en stabilisation de terrils. Le présent manuscrit est relatif à la première de ces applications. Au pied des Andes, dans le Nord du Chili, dans le désert d'Atacama, on trouve d'importants sites miniers de potassium et de lithium: les eaux chargées en sels sont pompées et amenées par conduites dans de grands bassins d'évaporation. Ces bassins, étanchéifiés à l'aide de géomembranes PVC, constituent les installations les plus grandes au monde avec ce type de matériau, elles sont même discernables à partir d'une navette spatiale. Après une présentation du concept de traitement des sels extraits, l'installation de la géomembrane, dans des conditions extrêmes, est détaillée ainsi que la mise en œuvre du procédé original de soudure sélectionné et la démarche contrôle effectuée sur site.

ABSTRACT

Being the world's largest natural supply of lithium, which is mined on a large scale, the Atacama desert has rich deposits of minerals. Solar evaporation ponds are used extensively to concentrate brine and harvest crystalline salts from saturated solutions in the production of iodine, nitrate, potassium and lithium. For example, very huge containment ponds lined with a PVC geomembrane are exploited in Northern Chile. Damage to liners has a direct impact on the loss of brine, which is accountable by the Environmental Chilean Agency, affecting the global process of salts precipitation by disturbing the thermodynamic equilibrium in containment ponds.

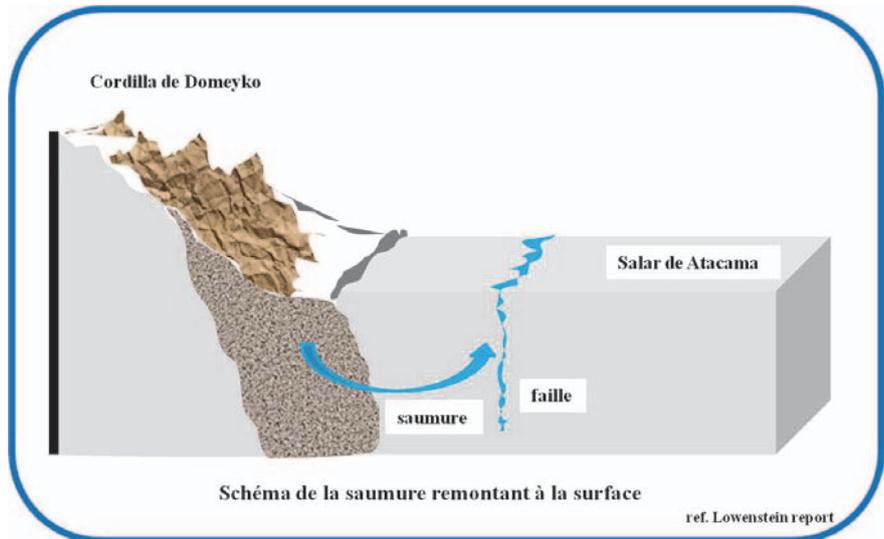
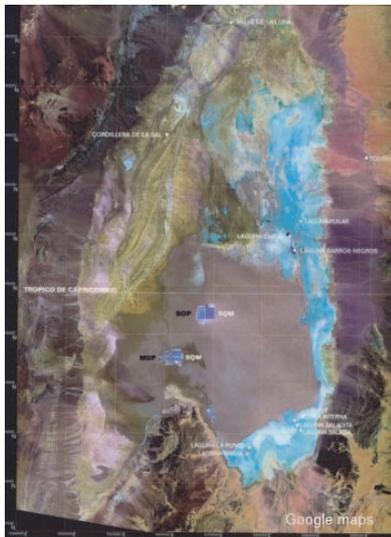
1. Introduction

Le lithium est surnommé « l'or gris ». Si ce métal est courtisé, c'est qu'il est utilisé dans les nouvelles technologies, pour les batteries des voitures électriques et de téléphones portables ou d'ordinateurs, mais aussi la verrerie et la médecine. Selon la « Comision Nacional del Cobre » (cochilco) le lithium est passé de \$2000 à \$6000 par tonnes sur les marchés internationaux entre 2001 et aujourd'hui. Les principales ressources de lithium dans le monde sont situées dans le « Triangle du lithium », composé de la Bolivie, de l'Argentine et du Chili. Avec 40 % du marché mondial, le Chili est actuellement le premier producteur mondial du précieux minerai. La production annuelle de la société SQM (Sociedad Quimica y Minera) s'élève à environ 21000 tonnes de carbonate de lithium.

C'est dans l'immense désert chilien d'Atacama que l'extraction du lithium andin est la plus avancée. Il est extrait à l'extrême nord du pays, dans le Salar d'Atacama avec ses 3000 kilomètres carrés. C'est l'un des endroits les plus arides du monde à 2130 mètres d'altitude dans la cordillère des Andes, un désert aride, écrasé par le soleil et battu par les vents. Long de 1000 kilomètres, ce désert d'altitude est le lieu le plus sec de la planète, avec des précipitations annuelles inférieures par endroits à 1 mm. Dans un paysage lunaire fait de bassins d'évaporation et de montagnes de sel immaculées, une saumure est pompée à grande échelle pour en extraire le précieux minerai. Le travail s'effectue dans des conditions extrêmes de rayonnement ultraviolet. Après neuf mois d'évaporation dans les grands bassins construits à cet effet et imperméabilisés à l'aide d'une géomembrane en PVC, le lithium est transporté vers une usine, où il subit des traitements qui le transforment en carbonate de lithium, prêt à l'exportation. Selon Patricio Contesse, directeur de SQM, les réserves sont estimées à « 93 millions de tonnes, du lithium pour au moins mille ans! » (Figaro 05-02-2011).

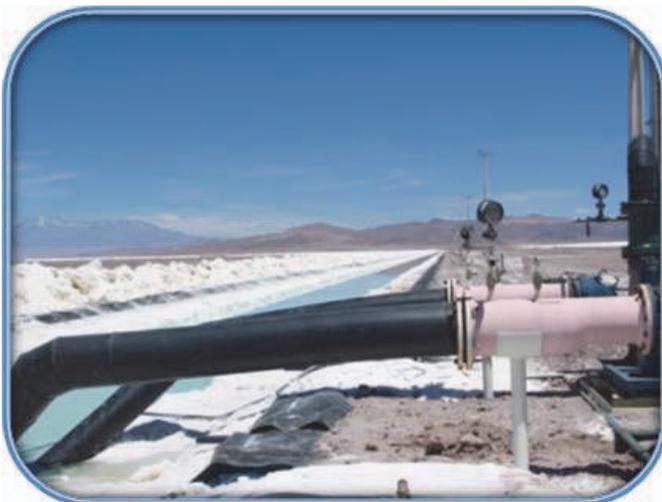
Le salar d'Atacama s'est formé dans une dépression endoréique qui reçoit le Río San Pedro et de nombreux ravins et cañons par où arrive l'eau depuis la cordillère des Andes (figures 1 et 2). La saumure provient de la dissolution des sels du sol volcanique de la région environnante, par les eaux apportées par les précipitations sur la chaîne andine toute proche. Dans un premier temps, ces dernières s'infiltrèrent et s'accumulent dans le sol, se chargeant de sels. Dans un deuxième temps, il se

produit un affleurement de ces eaux souterraines dans la dépression du salar. Puis les eaux s'évaporent et les sels apportés s'accumulent, formant une croûte solide de sels minéraux. Celle-ci est cimentée par les poussières amenées par le vent du désert. L'épaisseur de sel y est au delà de 900 mètres en plusieurs endroits. Le salar d'Atacama a accumulé le sel halite durant les périodes Pliocène et Quaternaire sous des conditions alternant entre un lac salé et une plaine. Une grande partie de la croûte d'halite efflorescence en surface (transformation des sels qui perdent leur eau en devenant pulvérulents) recouvre le désert où la nappe phréatique se situe à moins de 1m de la surface. La faille est cachée sous cette croûte. Il est reconnu que le dépôt a été causé par l'évaporation de la saumure souterraine créant une plaine au dessus de la faille (Jordan et al., 2001).



Figures 1 et 2. Photo satellite et schéma de la faille au Salar Atacama

Sous le salar se trouve un lac salin. Pour produire du lithium, la saumure contenue dans la nappe phréatique sous la croûte de sel est pompée dans des canaux et déversé dans de grands bacs de décantation (figures 3 et 4). Cette saumure contient de nombreux minerais de valeur, dont le chlorure de sodium, la potasse et le lithium, qui vont se concentrer par évaporation dans ces bassins (figure 5). La composition détaillée de la saumure est présentée au tableau 1.



Figures 3 et 4. Pompage de la saumure vers un bassin d'évaporation



Figure 5. Sels cristallisés recueillis sur le salar Atacama

Tableau 1. Composition de la saumure du salar d'Atacama

Composition représentative de la saumure au désert d'Atacama						
élément	concentration					
	original		original	vers bassin sylvinite	vers bassin sulfates	du bassin carnallite
	M	% w/w	g/l	g/l	g/l	g/l
H ₂ O			873	856	80	867
Li ⁺	0.26	0.15	2.0	3.7	7.1	8.9
Na ⁺	4.22	7.95	93.2	72.0	40.0	4.0
K ⁺	0.53	1.7	22.0	46.8	37.0	4.0
Mg ⁺⁺	0.45	0.885	12.3	23.7	46.0	92.0
Cl ⁻	5.58	16.2	192.0	295.0	195.0	292.0
SO ₄ ⁻	0.17	1.32	23.3	45.0	88.0	23.0
H ₃ BO ₃	0.095	0.48	4.4	9.2	18	50
Ca ⁺⁺	0.01	0.036	0.03			
densité			1.227	1.258	1.284	1.323
Taux d'évaporation en mm/jour						
sel recueilli			halite (NaCl)	sylvine (KCl)	sulfates & carnallite (K & Mg)	lithium
été			8.0	7.3	5.7	
hiver			4.0	3.7	3.0	
ref: Hernandez R. Et al, 1981			ref: Garrett 1998			

2. Le procédé

Via différentes étapes d'évaporation, le NaCl (Halite) et le KCl (Sylvine) cristallisent en premier. Une solution résiduelle enrichie en lithium, sulfates, bore et magnésium est obtenue. Sous une atmosphère très sèche (c'est le cas en altitude dans les Andes ou au Tibet), le point de cristallisation des sels de lithium est atteint, ce qui permet d'éliminer tous les sels qui ont un point de cristallisation inférieur. L'eau

de la solution obtenue est alors presque complètement évaporée. Sels de lithium, bore, magnésium et sulfates sont alors séparés. Via un traitement à la soude, les sels de lithium précipitent. Au final, du carbonate de lithium mais aussi de nombreux sous-produits intéressants sont obtenus : sulfate de lithium, chlorure de lithium, chlorure de potassium (potasse), sulfate de potassium, acide borique, sulfate de magnésium, chlorure de magnésium (Bérubé et al., 2007, Diebel et al., 2002).

Pour y arriver, d'immenses bassins sont construits et imperméabilisés à l'aide d'une géomembrane en PVC pour contenir les solutions salines (figures 6 à 8). La dimension de ces bassins varie de 1 Mm² à 30 000 m² avec une dimension moyenne de 3 m de profondeur, de 300 m de largeur et de 1000 m de longueur. Dans le salar d'Atacama les premiers bassins ont été construits en 1996, la surface imperméabilisée a atteint 16 Mm² en 2007, 26 Mm² en 2012 et sera de 34 Mm² en 2013.



Figure 6. Un bassin vide



Figure 7. Un bassin rempli

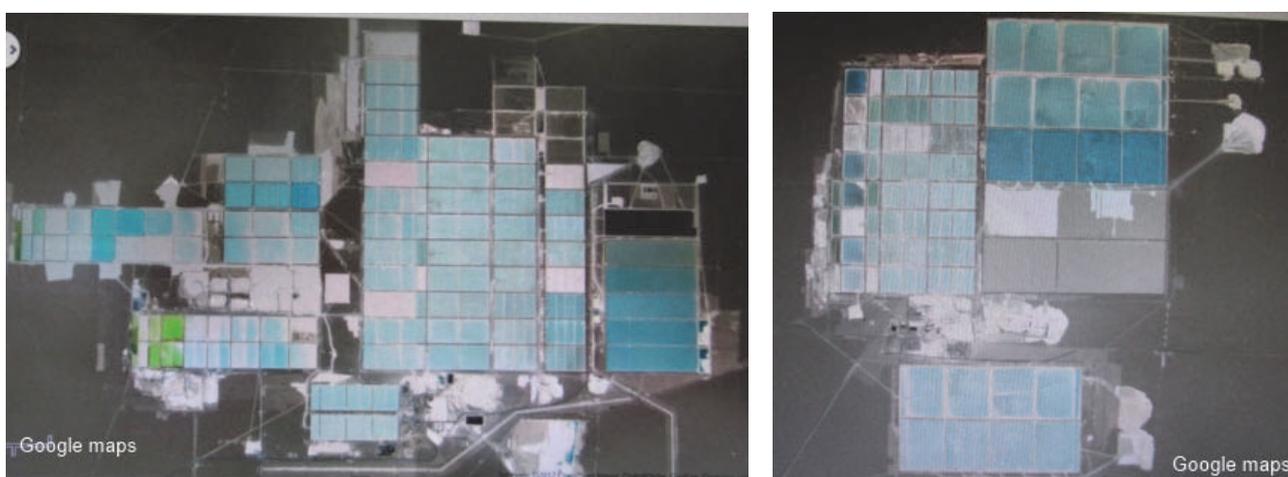


Figure 8. Vue satellitaire des bassins (Google maps)

3. Préparation de l'assise

Les bassins reposent sur la croûte de sel, qui doit être broyée, nivelée et compactée (figure 9). Par la suite les talus, de pente de 3H:1V et de largeur de crête égale à 4 m, sont construits (figure 10). Un géotextile non-tissé installé sur cette couche de sel naturel compacté procure une protection anti-poinçonnement (figure 11).



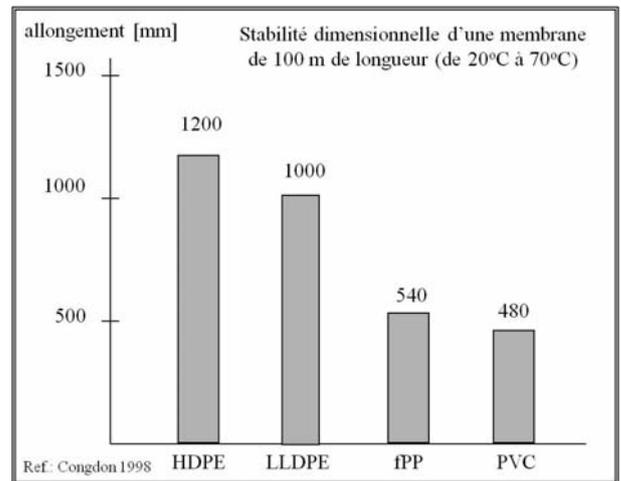
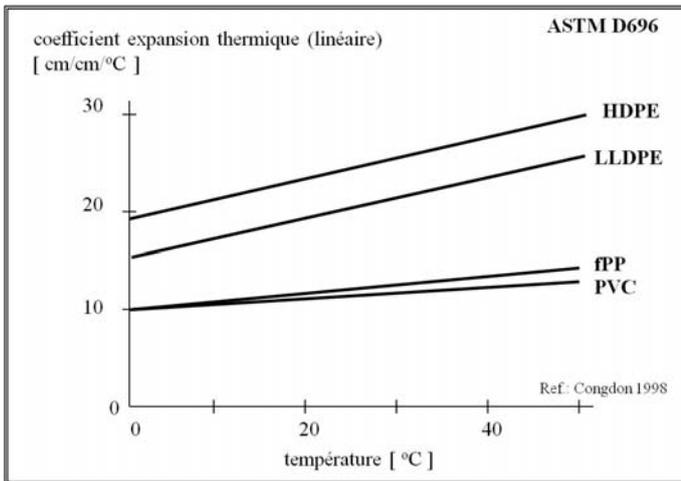
Figure 9. Préparation de l'assise



Figures 10 et 11. Construction d'un talus et mise en place d'un géotextile

4. La géomembrane

Une géomembrane en polychlorure de vinyle (PVC) de 0,75 mm d'épaisseur recouvre le fond et les pentes des bassins, et une géomembrane sacrificielle en HDPE recouvre le PVC sur la partie supérieure des pentes en protection du rayonnement UV. La sélection du PVC a été dictée par les raisons suivantes : la possibilité de livraison en panneau (pour minimiser le nombre de soudure en chantier), un minimum d'ondulation aux écarts quotidiens de température (grande stabilité dimensionnelle, figures 12 et 13), une résistance au poinçonnement et une grande flexibilité. La formulation du PVC étant très complexe (Rollin, 2004), les caractéristiques recherchées ont été déterminés pour assurer la durabilité, la flexibilité à des températures de congélation, la protection au poinçonnement (tableau 2 et figure 14). En résumé, les critères d'acceptabilité sont identifiés selon la norme ASTM D7176 (remplace PGI 1104), en plus de la résistance au poinçonnement plus grande que 231 N et de la teneur en plastifiant entre 30 et 35%.



Figures 12 et 13. Coefficient d'expansion thermique de géomembranes

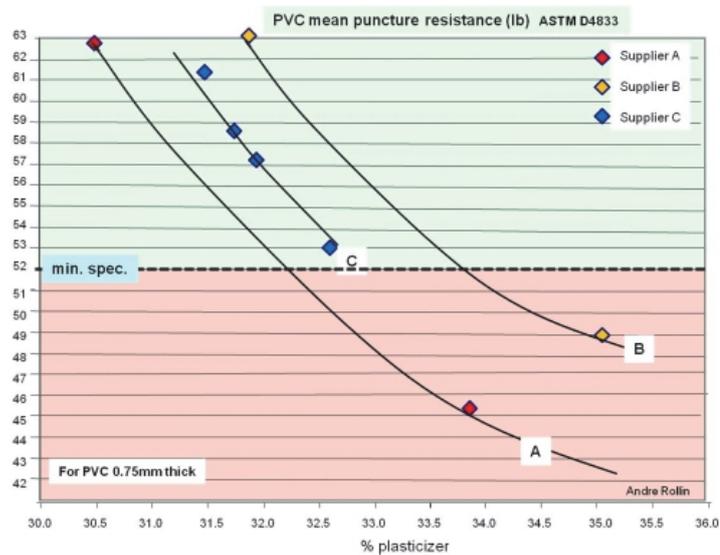


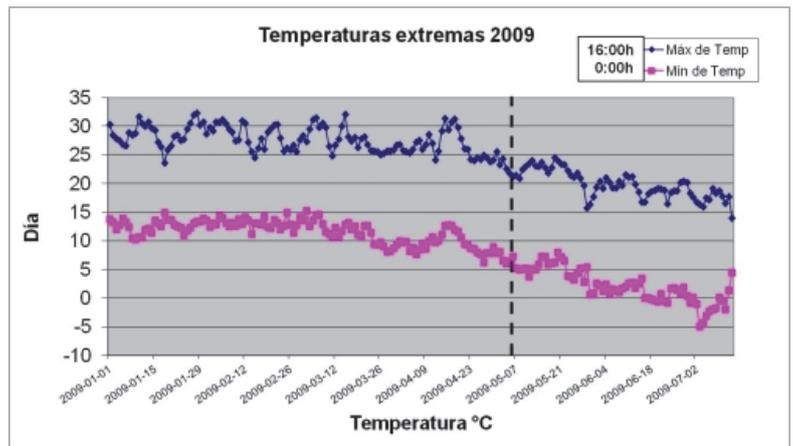
Figure 14. La résistance au poinçonnement en fonction de la teneur en plastifiant

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques du PVC

Caractéristiques du PVC – bassin évaporation Atacama		
propriété	ASTM	valeur
Épaisseur (mil)	D5199	30 ± 1.5
Densité (g/cm ³)	D792	1.2
Plastifiant		
teneur (%)	D2124	30-35
poids moléculaire moyen (g/mol)	D2124	> 400
Résistance au poinçonnement (N)	D4833	231
Flexibilité basse température (°C)	D1790	-29
Résistance à la déchirure min. (N)	D1004	35
Propriétés en traction	D882	
<i>direction machine</i>		
résistance à la rupture (kN/m)		12.8
allongement à la rupture (%)		380
module à 100 %		5.6
<i>direction transversale</i>		
résistance à la rupture (kN/m)		12.8
allongement à la rupture (%)		380
module à 100 %		5.6
Stabilité dimensionnelle (%) min	D1204	-3.0
Libération des matières volatiles (%) max	D1203A	-0.7
Extraction d'eau (%) max.	D1239	-0.15
Résistance hydrostatique (kPa) min.	D751A	690
Enterrément dans sol tensile var. max. (%)	G160	5, 20, 20
Résistance des soudures		
en cisaillement min. (kN/m)	D882 mod.	10
en pelage min. (kN/m)	D882 mod.	2.6

5. L'installation de la géomembrane

Les panneaux de PVC sont livrés en chantier en rouleaux préférablement à l'empilement « en accordéon » pour éviter l'altération aux coins durant le transport. Les dimensions moyennes des panneaux, constitués de 4 ou 5 lés, sont approximativement de 11 m de largeur et de 300 m de longueur, résultant en des rouleaux de 1,7 m de diamètre et 2,23 m de longueur pesant près de 3000 kg (figure 15). Suivant la largeur des rouleaux utilisés, 4 ou 5 soudures simples sont effectuées en usine à l'aide d'élément chauffant ou bien par ultrasons. La qualité de ces soudures est vérifiée sur la longueur totale via un jet d'air (méthode ASTM D 4545) et à l'aide d'un essai destructif selon une fréquence établie (ASTM D882). Durant la saison hivernale, il est recommandé que la température ambiante atteigne +5°C avant de manipuler ces rouleaux (PGI 2006) (figure16).



Figures 15 et 16. Dimensions typiques des rouleaux et profils de température en 2009

Le déploiement des panneaux sur le géotextile, préalablement installé sur l'assise, s'effectue en deux étapes. Un déroulement mécanique du panneau d'un talus à l'autre (300m de longueur) à l'aide d'un charriot élévateur permet de placer la géomembrane adjacente à un panneau déjà en place. Par la suite un déploiement manuel du panneau s'effectue (figure 17).



Figure 17. Déploiement d'un panneau de PVC

Le panneau déployé est annexé par soudure à la membrane déjà en place. Le joint était effectué à l'aide d'une soudure chimique, qui a été remplacé récemment par la technique de la double soudure avec canal pour vérifier rapidement la qualité de la soudure sur de grandes longueurs (figure 18).

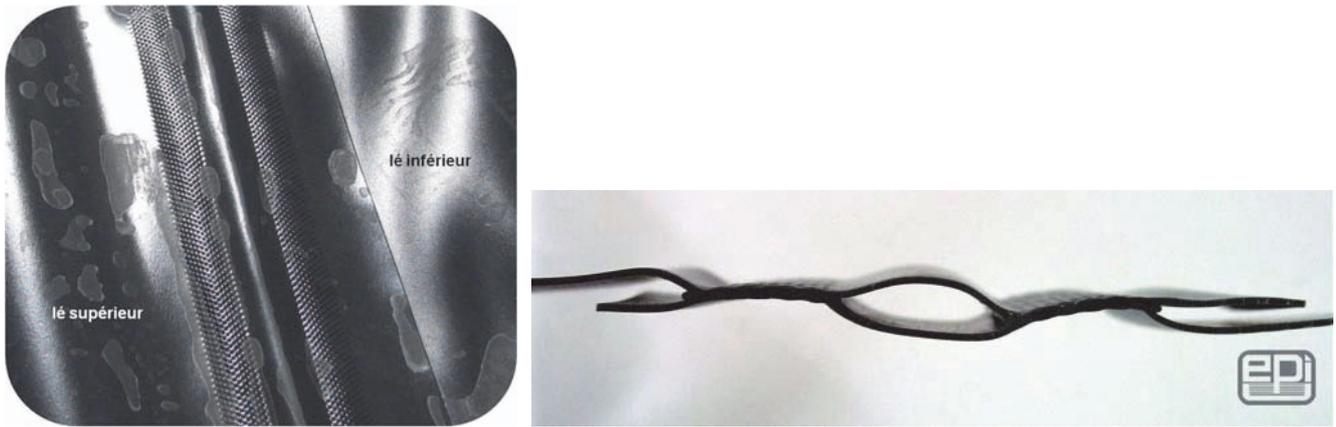


Figure 18. Soudure double avec canal

L'essai pour vérifier la qualité de la totalité des soudures est effectué selon la procédure ASTM D7177. Une pression doit être établie dans le canal en fonction de la température de la membrane tel que présentée à la figure 19. La température de surface de la géomembrane de PVC au Salar pouvant atteindre 70°C, une détermination de la pression a été nécessaire pour effectuer le test sous des conditions auxquelles le matériel devient très malléable. La soudure est qualifiée d'acceptable si la pression appliquée dans le canal est maintenue durant 30 secondes et qu'aucune déformation majeure n'est décelée (figures 20 et 21).

Sheet Temperature °F	Air Pressure (psi)
40 (6°C)	60 (418 kPa)
45	56
50	52
55	47
60	42
65	40
70	36
75	34
80	29
85	27
90	25
95	24
100	22
105	20
110	19
158 (70°C)	9 (60 kPa)

Procedure described in ASTM D7177 (pressure hold for 30 seconds)

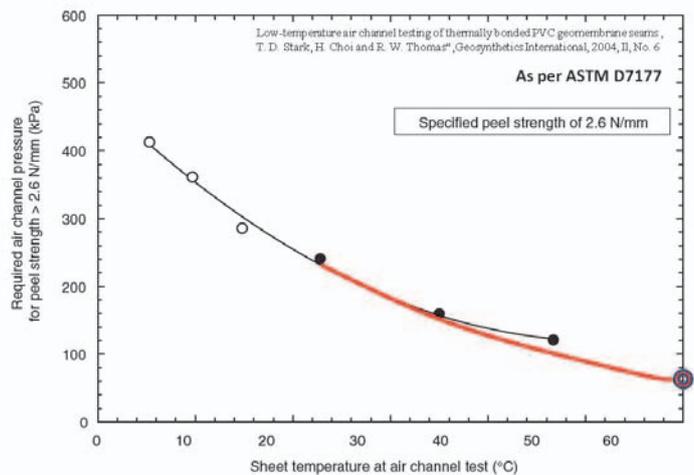


Figure 19. Pression appliquée lors de l'essai de vérification de la soudure



Figure 20. Assemblage pour l'essai de pression dans le canal



Figure 21. Photo d'une soudure partielle (EPI, USA)

Suite à la vérification de la qualité des soudures en chantier, l'intégrité de la surface totale est vérifiée par la technique de détection de fuites par la flaque d'eau selon ASTM D7002. Afin de localiser des fuites potentielles, la surface totale des bassins est vérifiée par des équipes utilisant plusieurs appareils simultanément, tel que montré sur la figure 22 (Jacquelin et al., 2008).



Figure 22. La détection de fuites par la méthode géoélectrique

6. Démarrage

Par la suite, deux façons de démarrer le procédé sont utilisées, soit par cristallisation naturelle ou par démarrage artificiel. Dans le premier cas, la saumure est introduite graduellement dans le bassin (figure 23). Le démarrage artificiel consiste à placer une couche de sel au fond du bassin avant d'introduire la saumure pour accélérer le processus de cristallisation.



Figure 23. Démarrage d'un bassin

7. La collecte des sels

Suite à une période de 9 mois d'opération, le bassin doit être vidangé. Les sels cristallisés sont alors asséchés, collectés et transportés soit vers les tas de sel ou vers l'usine de transformation (figures 24 et 25). La collecte comprend plusieurs étapes: l'arrêt d'alimentation de la saumure ; le pompage du liquide résiduel; la création de tranchées périphériques et pompage; la création de tranchées multiples; l'assèchement des sels par empilement; la collecte par chargeur ou avec fraiseuse de sels: la livraison vers l'usine de traitement ou des terrils de sel en camions.



Figure 24. Étapes d'assèchement des sels



Figure 25. Techniques de collecte des sels

8. Références bibliographiques

- Bérubé D., Diebel P., Rollin A., Stark T. (2007). Massive mining evaporation ponds constructed in Chilean desert, *Geosynthetics, February*
- Congdon J.P. (1998). Astryn flexible polypropylene resins – High performance materials for geomembranes, *technical guide Montell Polyolefins, August, 152 pages.*
- Diebel P. (2002). Lining evaporation ponds in the Atacama Desert, Chile, PVC Geomembrane Project, *PGI Technical Bulletin, fall*
- Garrett D. E. (2004). *Handbook of lithium, Lavoisier*
- Hernandez R., Martinez J. (1981). Extraction of lithium and magnesium salts with mixed ionin extractant, *Ind. J. Chem. Process, 20, pp. 698-704.*
- Jacquelin T., Bone C.S., Marcotte M., Rollin A.L. (2008). Recent results in geoelectrical leak location in the Chilean Mining Industry, *GeoAmericas, March , Cancun, Mexico.*
- Jordan T.E., Muñoz N., Hein M., Lowenstein T., Godfrey L., Yu J. (2001). Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile, *Geological Society of America*
- PGI (2006), PGI Quality Control Document, *section II, chapter on Deploying the liner.*
- Rollin A.L., Pierson P., Lambert S. (2002). PVC Geomembrane. *Chap 4, Geomembranes:guide de choix, Editor Presse internationale, Ecole Polytechnique, Montreal.*
- Rollin A.L. (2004). Functional formulation of PVC Geomembranes, *GFR 2004, Oct.*
- Stark T.D., Choi H., Thomas R.W. (2004). Low-temperature air channel testing of thermally bonded PVC geomembrane seams, *Geosynthetics International, II, No. 6.*
- Thomas R.W., Stark T.D., Choi H. (2003). Air channel testing of thermally bonded PVC geomembrane seams, *Geosynthetics International, 10, No. .2*