

# OPTIMISATION DE L'INTÉGRITÉ GLOBALE D'UNE GÉOMEMBRANE À L'AIDE DE LA DÉTECTION GÉOÉLECTRIQUE DE FUITES

## OPTIMISATION OF THE GLOBAL IMPERVIOUSNESS OF A GEOMEMBRANE THROUGH THE USE OF GEOELECTRICAL LEAK DETECTION

M. MARCOTTE, A. L. ROLLIN, T. JACQUELIN, B. FORGET  
SOLMERS INC., 1471 boul. Lionel-Boulet , bureau 22, Varennes J3X 1P7, Canada

**RÉSUMÉ** - Bien que manufacturées sous contrôles sévères, les géomembranes présentent généralement après leur pose plus de défauts que prévus par le concepteur. Une compilation de résultats présentée récemment concernant les résultats obtenus de l'application des techniques de détection de fuites sur géomembranes révèle l'importance du choix des épaisseurs de géomembranes préconisées et le sérieux des modes de contrôle mis en oeuvre en chantier pour assurer la qualité globale des ouvrages de confinement dont ils assurent l'étanchéité. Cet article vise à démontrer que les Programmes d'Assurance Qualité en Chantier (PAQC) incluant la prospection géoélectrique des membranes ont un impact élevé sur la performance globale des systèmes d'étanchéité pour des coûts moindres que le surdimensionnement des matériaux.

**Mots-clés:** Détection géoélectrique de fuites, géomembrane

**ABSTRACT** - While manufactured under stringent quality control programs, most liners generally leak more than expected by the designer. Collected data recently submitted addressing the results of the application geoelectric leak detection reveal the importance of choosing the proper thicknesses as well as the priority that should be given to a proper Construction Quality Assurance program to ensure the overall performance of confinement facilities. This paper shows that rigorous CQA programs by an independent, full time third party including geoelectric leak detection surveys have more impact on such a global performance than liner thickness for lesser costs compared to the overdimensioning of the materials.

**Keywords:** Geoelectrical leak detection, geomembrane

### 1. Introduction

Les géomembranes, utilisées seules comme matériaux d'étanchéité en remplacement d'argile compactée sont, à tort, perçues comme totalement étanches et sans défauts. Bien que manufacturées sous contrôles sévères, elles présentent après leur pose nombre de défauts qui résultent de la nature du substratum, de l'assemblage des lès, de leur recouvrement par des matériaux granulaires et des méthodes de mise en place de ce recouvrement (Colucci et Lavagnolo 1995, Laine et Darilek 1993, Phaneuf et Peggs, 2001).

Ainsi, les données recueillies depuis plus de 15 ans révèlent que près de 97% des défauts trouvés sur les géomembranes sont causés par les activités liées à leur mise en place (Rollin et al, 2002).

En pratique, la mise en place sur le terrain de ces matériaux, argile et géomembrane, affecte leur comportement global vis-à-vis de leur capacité à retenir un liquide. L'argile peut être affectée par les conditions climatiques (sèche, gèle et se fissure) qui réduiront sa performance d'au moins deux ordres de grandeur. Elle peut être affectée par la nature des liquides qui la traversent ou avec lesquels elle est mise en contact.

L'intégrité des géomembranes est aussi affectée par leur pose sur des matériaux granulaires inappropriés, coupées, déchirées ou perforées par des objets contondants ou par les matériaux granulaires et les équipements utilisés pour les recouvrir. Ces impacts seront d'autant plus importants selon que la température existant lors de la pose est basse ou élevée.

Par ailleurs, si les essais de chantier sur argile ne peuvent raisonnablement couvrir chaque mètre carré de toute la surface installée en étanchéité pour en caractériser l'état après mise en place, l'application d'une méthode reconnue de prospection géoélectrique lors de la mise en place d'une géomembrane peut, elle, avoir cette prétention.

Giroud et Bonaparte (1989) ont cherché à évaluer les débits de fuites de géomembranes intercalées entre des couches de sol perméable de haute qualité, en se basant sur la présomption d'une seule fuite par acre, soit une fréquence moyenne de 2,5 fuites par hectare.

Il est important de noter que cette évaluation relativement optimiste a précédé l'utilisation des techniques de détection géoélectrique de fuites et présuppose l'application d'un programme contrôle qualité rigoureux par un tiers expert en chantier. Ces données sont généralement utilisées par les concepteurs pour anticiper le débit de fuites provenant d'un ouvrage de confinement.

En général, les résultats des prospections géoélectriques indiquent que des débits de fuites sensiblement plus importants que ceux prévus par Giroud et Bonaparte (1989) sont prévisibles sur des sites où les PAQC ont été réduits au minimum, négligés, simplement évités et où les fuites existantes n'ont pas été réparées. (Rollin et al, 2002).

Cet article se propose, dans un premier temps, d'explicitier le principe de fonctionnement des techniques de détection géoélectrique de fuites sur géomembrane exposée et recouverte. Dans un deuxième temps, les données obtenues sur une période de plus de 10 ans de prospection sont résumées et comparées avec des données provenant de sources différentes. Finalement, une comparaison entre les données obtenues et les données utilisées actuellement par l'industrie permettra de démontrer que le débit de fuite réel d'un ouvrage est ou peut être, dans la plupart des cas, largement supérieur au débit de fuites anticipé par le concepteur.

## 2. Description des méthodes

Développées depuis le milieu des années 80, en parallèle avec le développement rapide de l'utilisation des géomembranes dans le domaine de l'environnement, les principales techniques de détection de fuites utilisées de nos jours ont été décrites dans plusieurs publications dont celles de Peggs (1989, 1990, 1993), Darilek et al. (1988, 1989, 2005), Forget et al (2005), Laine et al. (1989, 1991, 1993), Nosko et al (1996) et Rollin et al. (1999, 2002, 2004).

En France, le Comité français des Géosynthétiques (CFG) a préparé et publié un fascicule de recommandations « *Détection de fuites dans les dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques* ». Le guide présente les méthodes les plus couramment utilisées, le principe de fonctionnement, les domaines d'application, les conditions d'utilisation ainsi que les types d'ouvrages dont l'étanchéité peut être ainsi testée. L'ensemble de ces méthodes, bien décrit dans le guide du CFG, donne un aperçu détaillé des possibilités actuelles dans ce domaine.

En Amérique du Nord, l'American Standards for Testing Materials (ASTM) a regroupé en 2002 une partie de cette information dans le document ASTM D6747 (Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Detection of Potential Leak Paths in Geomembranes) et, en 2003, dans les normes ASTM D7002 (Standard Practice for Leak Location on Exposed Geomembrane Using the Water Puddle System) et ASTM D7007 (Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials). Ces deux dernières normes sont applicables aux deux méthodes décrites ci-après.

La *méthode du jet* d'eau (ASTM D7002) consiste à créer une différence de potentiel entre le sol sous-jacent à une géomembrane et un film d'eau projeté à sa surface par un diffuseur. La plupart des géomembranes sont des isolants électriques et dès que de l'eau s'infiltré au travers d'une perforation et atteint le matériau de support, un "pont" est créé entre ces deux potentiels et celui-ci produit un courant électrique. Un détecteur en indique alors la présence à l'opérateur par un signal sonore et visuel. Cette technique permet la détection de fuites de dimension plus grande que de  $1 \text{ mm}^2$  (ASTM D7002). Pour témoigner de la sensibilité de cette technique, Caquel et al (2006) confirme que 100% des défauts ayant 3 mm ou plus de diamètre ont été localisés par des opérateurs différents sur des géomembranes préparées à cet effet.

Les installations nécessaires sur place sont minimales et permettent généralement l'application de la technique même durant l'installation de la géomembrane. Le taux de prospection est d'environ  $4\ 000 \text{ m}^2$  /j-opérateur, compte tenu des conditions de chantier avec un approvisionnement continu en eau d'environ  $4 \text{ m}^3$ /j-opérateur. L'approvisionnement en eau peut se faire à l'aide d'un camion-citerne, d'une connexion directe au réseau d'adduction local ou, si l'approvisionnement est plus problématique, d'un système en circuit fermé depuis un point bas, souvent un puisard de collecte sécurisé, sur le site. La figure suivante présente un schéma général de la méthode du jet d'eau.

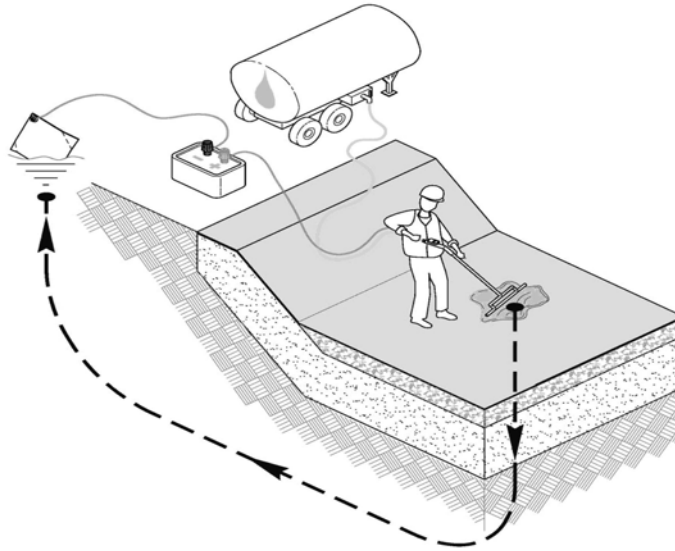


Figure 1: Méthode du jet d'eau sur une géomembrane exposée

Développée dès le milieu des années 80, *la technique du dipôle* (ASTM D7007) utilise un potentiel électrique appliqué entre le matériau de recouvrement (au-dessus de la géomembrane) et le sol sous-jacent. Puisqu'en général les géomembranes synthétiques sont des isolants électriques efficaces, la présence d'une fuite crée un passage local de courant qui perturbe le champ de potentiel des matériaux sus-jacents d'une façon distinctive. Les fuites sont localisées par enregistrement des lectures de potentiel avec le dipôle sur des grilles de densité prédéterminées.

Lorsque les conditions climatiques sont modérées, la préparation sur place est minimale. Il peut être nécessaire de répandre de l'eau sur la surface de recouvrement pour assurer une conductivité électrique adéquate. La limite de détection est variable, mais permet généralement la détection de perforations de dimensions de 6 mm<sup>2</sup> ou plus (ASTM D7007). La figure suivante présente un schéma général de la méthode du dipôle.

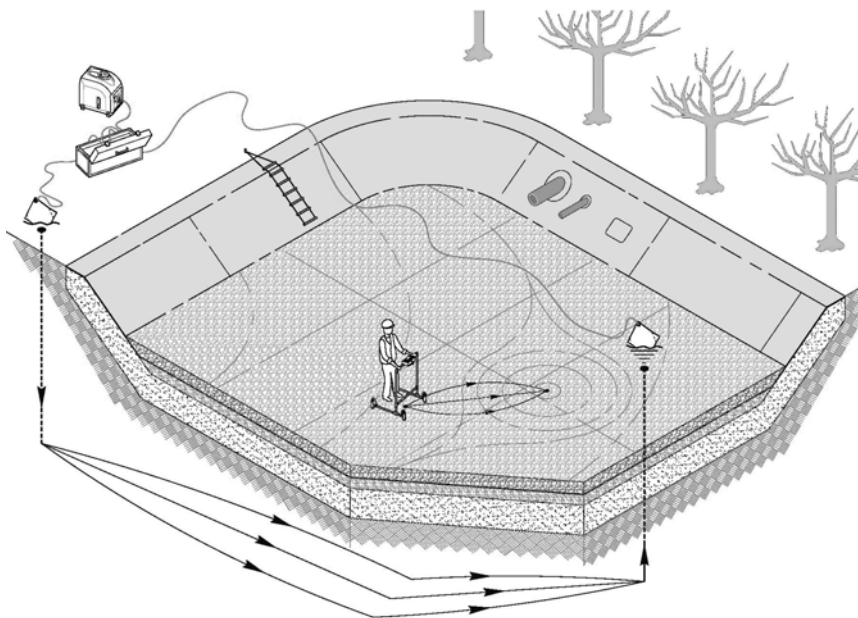


Figure 2. Technique du dipôle sur une géomembrane recouverte

En résumé, ces méthodes, appliquées durant les travaux d'aménagement des ouvrages d'étanchéité permettent la détection et la localisation des perforations d'une certaine dimension pour réparation immédiate, avant la mise en service de l'ouvrage. Elles ne permettent pas un suivi à long terme de l'efficacité des étanchéités et ne remplacent jamais l'opération adéquate de ces ouvrages.

### 3. Présentation des résultats

Dans cet article, le terme Programme d'Assurance Qualité en chantier (PAQC) signifie le contrôle à l'externe de la pose de la géomembrane et de toutes les étapes de son recouvrement. Cette surveillance par un professionnel expérimenté (tiers expert) est réalisée sous présence constante du surveillant durant toute la durée des travaux sur le terrain, incluant l'acceptation des assises par le poseur et la période de recouvrement des membranes par les matériaux granulaires prévus. Cette notion de PAQC rigoureux est essentielle à la compréhension des tableaux suivants.

Les résultats de prospection sur près de 1 000 000 m<sup>2</sup> de membranes de PeHD sont résumés au tableau I. Ils y sont comparés aux travaux de Colucci et Lavagnolo (1995) pour fins de référence.

Dans ce tableau, la densité de fuites équivalente par hectare (DFE) est définie comme la somme des défauts trouvés en fonction de la surface totale prospectée (en hectare) sans égard pour la densité de fuite moyenne (DFM) qui serait obtenue de chaque prospection. Chaque colonne présente la DFE pour une épaisseur donnée de membrane.

Tableau I. Densité de fuites, géomembrane de PeHD

Épaisseur	Densité de fuite équivalente (DFE) (Surface totale considérée m <sup>2</sup> )					
	Géomembranes PeHD exposées (DF par Jet d'eau)		Géomembranes PeHD recouvertes (DF par Dipôle)			
	DFE sans PAQC	DFE avec PAQC rigoureux	DFE sans PAQC ni sans jet d'eau avant recouvrement	DFE avec PAQC, sans jet d'eau avant recouvrement	DFE avec PAQC rigoureux, sans jet d'eau avant recouvrement	DFE avec PAQC rigoureux et jet d'eau avant recouvrement
2,5 mm				<b>14,6</b> (157 013) *	<b>9,3</b> (69 947) <sup>1</sup>	
2,0 mm		<b>3,2</b> (362 460)	<b>15,6</b> (50 600)	<b>16,3</b> (118 669) <sup>1</sup>		<b>2,0</b> (170 190)
1,5 mm		<b>5,1</b> (66 880)	<b>24,7</b> (10 500)			
1,0 mm	<b>31,5</b> (313 770)	<b>20,5</b> (17 070)				

\* : Colucci et Lavagnolo (1995)

À titre d'exemple, dans le cas de la technique du jet d'eau, une moyenne de 20,5 défauts/ hectares a été trouvée sur une membrane PeHD de 1,0 mm après sa mise en place sous contrôle d'un PAQC rigoureux. À défaut d'un tel PAQC, le nombre moyen de fuites trouvées serait de 31,5 défauts/ hectare.

Dans le cas de la technique du dipôle, les résultats présentés au même tableau dévoilent que le recouvrement des membranes posées sans surveillance et recouvertes sans surveillance constante par des matériaux granulaires a créé suffisamment de défauts pour qu'une prospection par dipôle détecte en moyenne 24,7 défauts/hectare pour une membrane PeHD de 1,5 mm d'épaisseur. Dans le cas d'une membrane de 2,0 mm d'épaisseur, cette DFE est réduite à 15,6.

En reprenant les chiffres de Colucci et Lavagnolo (1995) pour des membranes de 2,5 mm destinées à des ouvrages de confinement dits à sécurité maximale (classe I) vis-à-vis des ouvrages de classe II, la DFE des défauts passe de 9,3 à 14,6. L'impact de la sévérité du PAQC apparaît ici d'évidence.

Par ailleurs, une revue de la littérature constate que les résultats de prospection géoélectrique sont généralement présentés sans égard à l'épaisseur de la feuille, ce qui, les résultats du tableau 1 en témoignent, affecte grandement la signification de la valeur observée et donc la validité des moyennes qui en sont tirées. Il est entendu que la répartition des différentes épaisseurs en termes d'utilisation dans le marché affecte la représentativité des résultats présentés dans les publications disponibles sur le sujet.

Les résultats obtenus de différents projets de prospection géoélectrique sont présentés au tableau II selon une pondération des différentes fractions du marché. Il en résulte une valeur typique de l'ordre de 8,3 défauts par hectare pour une membrane exposée.

Tableau II. DFE sur géomembranes exposées de PeHD

Épaisseur de la géomembrane	Proportion du marché	DFE sans PAQC	DFE avec PAQC
2,0 mm	35%	5.0 <sup>(1)</sup>	3,2
1,5 mm	40%	7.5 <sup>(1)</sup>	5,1
1,0 mm	25%	31.5	20,5
<b>Valeur moyenne présentée sans égard à l'épaisseur</b>	<b>100%</b>	<b>12.6</b>	<b>8.3</b>
<b>Laine et Mosley 1993</b>		<b>14</b>	

(1) Valeur estimée sur la base des données typiques

A titre de comparaison, le même exercice pour des membranes sans PAQC est effectué pour compléter le tableau et les résultats ainsi obtenus comparés aux données de Laine et Mosley (1993). Par ailleurs, il est entendu que d'autres défauts seront causés par le recouvrement de la membrane. Ainsi, Phaneuf *et al.* (2001) suggèrent que 73% des défauts sont créés par le recouvrement des membranes, soit 3 défauts supplémentaires pour chaque défaut observé sur la feuille exposée. En projetant cette valeur sur la DFE obtenue avec un PAQC rigoureux, la valeur moyenne présentée sans égard à l'épaisseur pour anticiper les défauts sur membranes recouvertes serait, dans cette logique, de l'ordre de 33,2 défauts à l'hectare, ce qui excède largement l'hypothèse de Giroud et Bonaparte (1989).

Du point de vue du débit de fuites, Phaneuf *et al.* (2001) ont évalué que la détection géoélectrique permettait de réduire le débit de fuites moyen de sept fois. Les débits de fuites mesurés dans les systèmes secondaires de plusieurs sites après la détection géoélectrique et les réparations afférentes variaient entre 70 et 140 litres/hectare-jour. À titre de comparaison, un trou de 3,1 mm, sous 300 mm de charge, pourra générer un débit de 950 litres/ha-jr.

#### 4. Discussion des résultats

Sans présumer de la généralité de ces valeurs ni de leur valeur statistique, elles indiquent clairement que le nombre de défauts créés dans les géomembranes lors la réalisation des travaux de pose peut être appréciablement plus important que celui que les concepteurs prennent généralement en compte. Dans ce contexte, les résultats présentés au tableau I permettent de déceler certaines tendances :

- l'accroissement des épaisseurs de membranes réduit la fréquence moyenne de défauts; sur la base du comportement d'une membrane de 1 mm d'épaisseur, un accroissement d'épaisseur de 50%, soit un accroissement de coût de 25%, verra une probabilité de fuites réduite de 75%, c'est-à-dire que le débit de fuites anticipé serait 4 fois plus faible;
- le nombre de défauts estimé pour les sites existants ayant fait l'objet d'un PAQ rigoureux sans détection géoélectrique de fuites serait en moyenne de 8.3 défauts/hectare en tenant compte de la répartition du marché des géomembrane. Ce nombre de fuites dépasse largement celui anticipé lors de la conception de plusieurs sites (2.5 défauts/hectare). De plus, pour les géomembranes qui auront été recouvertes, le nombre de fuites aura logiquement encore augmenté.

A titre de comparaison, Beech *et al.* (1998) mentionnent que certains états américains limitent la quantité de lixiviat dans le système secondaire d'un centre de stockage à 180 l/ha-jr ce qui définit la qualité de la membrane primaire en lui imposant une équivalence avec une argile offrant, dans les mêmes conditions, une perméabilité moyenne de  $1,6 \times 10^{-10}$  m/sec. En prenant ce paramètre comme base, il apparaît évident que même un site ayant fait l'objet d'un PAQC rigoureux, mais sans appliquer une prospection géoélectrique de détection de fuites dépassera de plusieurs fois le critère établi (DFE>2,5). Dans ce contexte, il faut convenir que la question d'imposer un PAQC incorporant la prospection des fuites sur les géomembranes aux centres de stockage en France est d'actualité.

Une façon de diminuer le nombre de défauts lors de l'installation d'une géomembrane est d'augmenter son épaisseur. La détermination de l'impact économique du choix d'une épaisseur de géomembrane vis-à-vis l'application d'un programme d'Assurance Qualité est relativement facile à déterminer puisque les travaux de pose dépendent peu de l'épaisseur. De même en est-il pour l'application d'un PAQC rigoureux qui ne dépend que de la vitesse d'avancement des travaux et de la surface à imperméabiliser.

Ainsi pour une progression des travaux de 2 000 m<sup>2</sup> par jour, le coût de la présence permanente d'un surveillant qualifié ne représente que de 6% du coût des travaux. La détection de fuites par jet d'eau a un coût de revient qui s'établit généralement à 2,5% du coût de la pose alors qu'une prospection sérieuse au dipôle en vaudra le double. En considérant que la valeur typique d'une membrane de 1 mm est de l'ordre de 6 euros/m<sup>2</sup>, en accroître l'épaisseur à 2 mm ajoute 25% au coût unitaire. Ajouter une couche de géocomposite bentonitique ou d'argile compactée pour constituer une membrane composite doublera le coût de l'étanchéité. Constituer une double étanchéité de même qualité ajoutera au moins 13 euros/m<sup>2</sup> soit 162% du coût de la première étanchéité; il est donc important d'évaluer au mérite l'avantage qualité de chacune des solutions.

Dans le contexte des travaux, la variabilité des conditions *in situ*, des intervenants et des moyens mis en œuvre pour atteindre les résultats attendus sont de nature à forcer des écarts-types importants dans les résultats obtenus. Ainsi en est-il du nombre de défauts « raisonnablement » prévisibles après la pose de la géomembrane qui ne peut qu'être estimé.

Toutefois, s'il est entendu que la détection de fuites par prospection géoélectrique trouve la grande majorité des défauts créés lors de la mise en place, certains dommages trop petits, se situant au-delà des limites de détection, certaines conditions de chantier particulières, les points singuliers, la présence de masques électriques et même les limites d'appréciation de l'opérateur sont toutes des raisons imposant néanmoins le principe de précaution.

## 5. Conclusions

La géotechnique du confinement a grandement évolué depuis l'apparition à grande échelle des géomembranes. Particulièrement en ce qui a trait aux centres de stockage qui ont mobilisé plus de 60% de la production de ces membranes en 2002 de par le monde. Même si nombre de réglementations imposent plus ou moins l'usage de ces matériaux synthétiques, cette obligation en reste généralement une de moyen et la performance attendue est rarement décrite dans les réglementations.

S'il est cependant démontré qu'à l'aide d'un PAQC rigoureux et des techniques de détection de fuites sur géomembranes, il est possible de réduire le débit de fuites en-dessous d'un critère acceptable tel celui du 180 litres/ha-jour, l'avantage de ces dernières sur la couche d'argile passive est alors démontrée par la possibilité de documenter sa qualité.

Sans être formel, ni conforme à la géométrie particulière des écoulements de tous les ouvrages, cet objectif a l'avantage d'être mesurable. Il pourrait donc constituer une règle de l'Art, un objectif raisonnable pour lequel un effort de moins de 10% du coût de la pose est consenti par les PAQC pour en assurer l'atteinte. Il aura de plus l'avantage de créer un standard qui favoriserait l'expansion du marché des géomembranes, imposant comme barrière à l'entrée de ce marché la qualité de l'étanchéité comme valeur déterminante d'un projet.

C'est dans ce contexte que le développement des méthodes de détection de fuites applicables aux travaux de construction est utile pour tous les intervenants dans un projet d'étanchéité d'ouvrages de confinement. Elle permet de justifier le choix d'une solution d'étanchéité (simple, composite ou double) et de l'épaisseur de membrane nécessaire à la conformité du rendu (qualité) au chantier, de recevoir les travaux de pose et d'assemblage de la géomembrane, libérant le poseur de son obligation de moyens (DF sur membrane exposée), et de libérer l'entreprise de terrassement de son obligation de précaution vis-à-vis l'état de la membrane après ses travaux (DF Dipôle sur membrane recouverte). Elle offre au maître d'ouvrage une réception des travaux qui soient conformes aux règles de l'Art et à l'état des connaissances dans le domaine.

Enfin, sachant que 97% des dommages découverts sur les géomembranes installées proviennent des travaux de mise en place, il est impératif d'assurer une surveillance complète de ces travaux par un tiers expert, incluant une détection de fuites appropriée. Non seulement pour vérifier que l'assemblage des différentes lès n'est pas la cause de défauts éventuels (surchauffe et fragilisation, sous-chauffage et décollement des soudures, etc.) mais aussi pour s'assurer que les bons moyens sont mis en œuvre pour réduire l'impact de sa mise en œuvre sur sa performance globale. Tel que mentionné précédemment, si

73% des défauts prévisibles dans les géomembranes proviennent de leur recouvrement alors qu'au moins 90% d'entre elles seront recouvertes par une couche de matériaux granulaires grossiers, la question de la surveillance permanente des travaux durant le recouvrement, incluant une détection de fuite par dipôle avant la mise en œuvre de l'ouvrage ne peut être aujourd'hui esquivée.

## 6. Références bibliographiques

- ASTM D6747 Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Detection of Potential Leak Paths in Geomembranes.
- ASTM D7002 Standard Practice for Leak Location on Exposed Geomembrane Using the Water Puddle System.
- ASTM D7007 Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials.
- Beech J.F., Cargill, K.W., Huff, W.J. (1998) Evaluation of liner system performance using liquid management data, *Proceeding 6 International Conference on Geosynthetics 1998*, p262-272, Atlanta
- Caquel et al. (2006) Évaluations des performances réelles d'un appareil de détection de fuites sur géomembranes, *Rencontre Géosynthétique 2006*, Montpellier.
- Colucci et Lavagnolo (1995) Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners, *Proceedings of Sardinia '93, CISA' Cagliari*, October
- Darilek G.T., Parra J.O. (1988) The Electrical Leak Location Method for Geomembrane Liners, *USEPA/600/S2-88/035*, Sept.
- Darilek G.T., Laine D., Parra J.O. (1989) The Electrical Leak Location Method for Geomembrane Liners, *Proceeding of Geosynthetics' 89, IFAI*, pp 456-462, San Diego.
- Darilek G.T., Laine D., (2005) Leak location technology-25 years of evolution, *GFR September 2005*, 20-22.
- Forget B, Rollin A.L., Jacquelin T. (2005a) Lessons Learned from 10 Years of Leak Detection Surveys on Geomembranes, . *Proceed. Sardinia 2005*, Sardinia.
- Forget B, Rollin A.L., Jacquelin T. (2005b) Impacts and Limitations of Quality Assurance on Geomembrane Integrity , . *Proceed. NAGS 2005*, Las-Vegas.
- Giroud J.P., Bonaparte R. (1989) Leakage through Liners Constructed with Geomembranes, II: Composite Liners, *Geotextiles and Geomembranes*, vol 8, no 2, pp 71-112.
- Laine D.L., Miklas M.P. (1989) Detection and Location of Leaks in Geomembrane Liners Using an Electrical Method, *Proceed. 10th Nat. Conf., Superfund'89*, Washington, Nov.
- Laine D.L. (1991) Analysis of Pinhole Seam Leaks Located in Geomembrane Liners Using the Electrical Leak Location Method, *Proceed. Geosynthetics'91*, Atlanta, pp 239-253.
- Laine D.L., Darilek G.T. (1993) Locating Leaks in Geomembrane Liners of Landfills Covered with a Protective Soil, *Proceed. Geosynthetics'93*, vol 3, pp 1403-1412, April.
- Laine D.L., Mosley N.G. (1993) Leak Location Survey of a Soil Covered Geomembrane at a Landfill Site in the UK, *Green '93 Conference Proceedings*, Bolton, United Kingdom, June 28 - July 1.
- Nosko V., Andrezal T., Gregor T., Garnier P. (1996) Sensor Damage Detection System – The Unique Geomembrane Testing Method, *Proceed. EuroGeo*, Netherlands pp 743-748.
- Phaneuf R., Peggs I.D. (2001) Landfill Construction Quality: Lessons Learned from Electrical Resistivity Testing of Geomembrane Liners, *Geotechnical Fabrics Report*, v19, no 3, April pp 28-35.
- Peggs I.D., Pearson D.L. (1989) Leak Detection and Location in Geomembrane Lining Systems, *ASCE Annual meeting*, Fort Lauderdale, September.
- Peggs I. (1990) Detection and Investigation of Leaks in Geomembrane Liners, *Geosynthetics World*, vol 1, issue 2., winter, pp 7-14.
- Peggs I.D. (1993) Advances and New Thinking in Landfill Liner Construction Quality Assurance Practices, *Proceedings of Sardinia' 93, CISA' Cagliari*, pp 121-128.
- Rollin A.L., Marcotte M., Jacquelin T., Chaput L. (1999) Leak Location in Exposed Geomembrane Liners Using an Electrical Leak Detection Technique", *Proceedings of Geosynthetics'99*, Boston, pp 615-626.
- Rollin A.L., Marcotte M., Chaput L., Caquel F. (2002) Lessons learned from geo-electrical leaks surveys, *Proceedings Geosynthetics 2002*, Nice pp 527-530.
- Rollin A.L., Jacquelin T., B. Forget, Saunier P. (2004) A guide to Detect Leaks on Installed Geomembranes, *Proceedings EuroGEO*, Munich, pp 235-240.