

ISOLATION ÉLECTRIQUE D'UN OUVRAGE ÉTANCHE : UNE NÉCESSITÉ POUR LA DÉTECTION DE FUITES DANS LES GÉOMEMBRANES

ELECTRICAL INSULATION OF A LINED POND: A REQUIREMENT FOR LEAK DETECTION ON GEOMEMBRANES

Carl CHARPENTIER, Michel MARCOTTE, André Léo ROLLIN
SOLMERS, Varennes, Québec, Canada

RÉSUMÉ - La nécessité d'effectuer des campagnes de *détections de fuites* sur géomembranes dans les ouvrages étanches n'est plus à démontrer. Le présent article décrit l'impact déterminant de l'*isolation électrique* sur la sensibilité de la méthode du dipôle comme résultats de simulations mathématiques et de l'utilisation d'une maquette à l'échelle. Lorsque l'ouvrage n'est pas isolé électriquement, une portion du courant dissipé par la source emprunte le chemin des autres ponts électriques au lieu de passer par les perforations, diminuant énormément le signal lu par l'opérateur. Tel que démontré par les auteurs, la répartition du signal est fonction des caractéristiques de la couche recouvrant la géomembrane et des accessoires liés à l'opération de l'ouvrage.

ABSTRACT - The need for leak detection is not a debate any more. But, as it is demonstrated in the present paper, the most important parameter influencing the results of such surveys is the electrical insulation. When the installation is not electrically insulated, part of the electrical current is sunk through various electrical bridges, lowering the current drawn in each perforation, thus lowering voltage response and default visibility. As developed by the authors, a simulation program analyses the voltage distribution inside the liner's covering layer and shows the influence of penetration through the liner installed for operation purposes.

1. Introduction aux méthodes de détection de fuites

Au cours des trente dernières années, la technologie des géomembranes s'est taillée une place importante dans l'industrie de l'étanchéité. Contrairement aux couches argileuses, les membranes permettent une inspection en tout point de leur intégrité. Plusieurs méthodes de détection de fuites existent pour vérifier l'intégrité d'une géomembrane. Tel que présenté dans le tableau I, chacune de ces méthodes a ses avantages et ses limites ainsi qu'un niveau de complexité qui lui est propre.

Tableau I : Principales méthodes de détection de fuites

Principales méthodes de détection de fuites en pleine surface	
Sur géomembrane exposée :	Sur géomembrane recouverte :
<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de la flaque (jet d'eau) - Méthode de l'arc électrique (<i>Spark Test</i>) - Méthode Sensor (permanente) 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode du dipôle - Méthode Sensor (permanente)

Dans le cadre de la présente étude, la technique du dipôle a été retenue pour deux raisons principales. Premièrement, la méthode du dipôle permet de compenser le fait que le recouvrement est la cause principale de défauts sur géomembranes (Phaneuf et Peggs, 2001). Deuxièmement, l'isolation électrique, le sujet principal de cet article, influence beaucoup plus la précision (sensibilité) de la méthode du dipôle que celle du jet d'eau. Cet impact est d'autant plus important que rien n'est visible de la surface et donc que l'efficacité de la méthode repose essentiellement sur cette sensibilité.

2. Explication de la méthode du dipôle

La prospection géoélectrique par dipôle est une technique applicable sur les géomembranes recouvertes. Le principe de la technique consiste à imposer une différence de potentiel électrique entre le sol sous la géomembrane et le matériau situé au-dessus (sol ou liquide).

La géomembrane se comporte comme un isolant électrique de résistivité très grande et a pour effet d'empêcher la propagation des courants électriques. Ainsi, le champ de potentiel dans les sols recouvrant la géomembrane est-il relativement uniforme. Or la présence d'une perforation dans la géomembrane crée un passage pour le courant électrique, qui perturbe localement le champ de potentiel de façon caractéristique. La mesure du potentiel sur le sol à l'aide d'une sonde mobile (dipôle), selon une fréquence prédéterminée (déplacement sur un maillage d'où une densité de lecture), permet la localisation précise de ces perturbations et donc la localisation des fuites éventuelles. La figure 1 présente le schéma de la méthode.

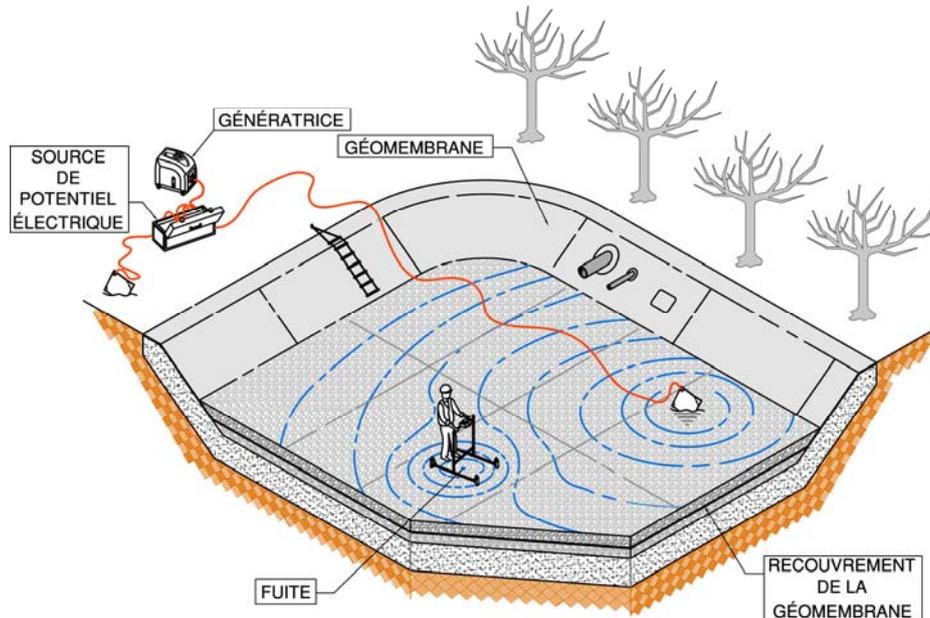


Figure 1. Schéma de principe de la prospection géoélectrique par dipôle

La norme ASTM D7007 « *Electrical methods for locating leaks in geomembranes covered with water or earth materials* » et le guide du comité français des géosynthétiques (CFG) « *Détection de fuites dans les dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques* » expliquent le principe de fonctionnement de la méthode et ses limitations. La technique et les résultats obtenus ont été abondamment présentés par plusieurs auteurs (Peggs, 1989 ; Rollin et al., 2004 ; Darilek et al., 1989 ; Phaneuf et Peggs, 2001 ; Nosko et Touze-Foltz, 2000 ; etc.).

En réalité, le principe de base de la détection de fuites par dipôle est que le courant électrique cherche à passer de l'électrode positive vers l'électrode négative. Toute chose dans la nature tend à trouver un équilibre neutre et c'est le même phénomène que l'on retrouve avec les différences de potentiel. La nature cherche à ramener le système à un potentiel neutre en vidant le surplus de potentiel positif dans le négatif.

Par contre, comme la géomembrane ne laisse traverser qu'une infime portion du courant global du système, celui-ci doit contourner cet obstacle pour rejoindre la zone à 0 volt (*ground*, électrode négative). Ce contournement est donc à l'origine de la recherche d'un pont électrique permettant ce passage : le pont recherché est une perforation susceptible d'être, lorsque mis en eau, une fuite.

2. Interprétation des résultats obtenus sur le terrain

Comme expliqué précédemment, une perforation dans une géomembrane créera une distorsion dans la répartition du potentiel du recouvrement. Un courant électrique dans toutes les directions (diffusion du courant) est émis par l'électrode positive. Cependant, le courant électrique convergera vers une perforation, si bien que le courant sur les côtés de la fuite revient également par derrière, ce qui génère localement un face-à-face électrique, tel qu'illustré sur la figure 2.

LIGNES DE COURANT AUX ENVIRONS D'UNE PERFORATION

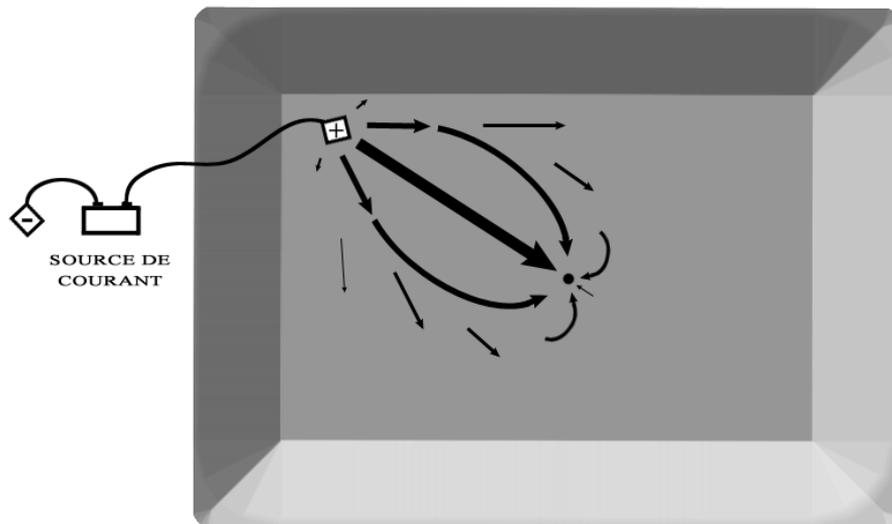


Figure 2. Lignes de courant aux environs d'une perforation

En aucun cas le courant électrique n'ira dans deux directions opposées de manière naturelle, sauf s'il afflue vers un chemin préférentiel sous ou sur la géomembrane (pont électrique).

Ce changement de signe est un élément clé dans la détection de fuites par dipôle. Lors d'une prospection sur une géomembrane intègre (en bon état), le signal électrique mesuré reste toujours du même signe lorsque l'opérateur avance dans une même direction. L'apparition d'un signal inverse, puis d'un retour au signe « normal » est un indice flagrant de la présence d'une perforation dans la géomembrane. Des courbes caractéristiques de signaux enregistrés pour différentes dimensions de perforation sont présentées sur la figure 3.

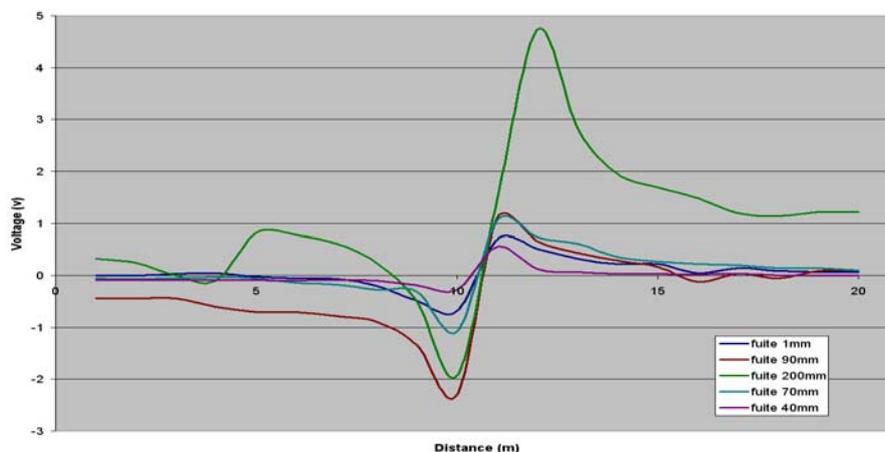


Figure 3. Différentes courbes réelles de fuites, signatures classiques

L'amplitude des signaux de fuites dépend de nombreux facteurs, comme la proximité d'un autre pont électrique, la distance entre la perforation et l'électrode positive, l'humidité du sol à cet endroit, la conductivité électrique des sols, etc. Ces paramètres sont propres à chaque site. Lors d'une détection de fuites par dipôle, l'opérateur doit trouver avec précision la position du signal maximum positif, noter la position du centre du différentiel, puis chercher le maximum négatif et noter la position du centre de ce différentiel. La fuite se trouve au centre de ces deux maximums. Lorsque la fuite génère un signal moindre, il est possible que sa signature soit celle habituelle mais sans changement de signe : le signal reste en tout temps positif ou négatif, avec des variations. C'est le cas lorsque la fuite est très petite ou que la géomembrane est perforée à plusieurs endroits, ou alors que le site en question n'est pas isolé électriquement.

3. Simulation numérique de dipôle par éléments finis

Afin de valider par calcul mathématique les résultats obtenus sur le terrain, une étude sur un système virtuel de dipôle a été réalisée récemment avec l'École Polytechnique de Montréal (Chouteau, 2006). Deux conclusions de ce rapport sont directement liées au sujet traité dans cet article :

- « Pour n perforations de même taille, la réponse à chaque perforation est n fois plus petite en amplitude que celle obtenue pour une perforation unique; la forme et la largeur de l'anomalie sont inchangées à l'exception de l'amplitude qui est divisée. » ;

- « Pour 2 perforations, les anomalies de potentiel (secondaire) et de gradient de potentiel seront dans le rapport des surfaces des perforations. L'amplitude de chacune sera $A_{si}/(s1 + s2)$ avec $i = 1,2$, numéro de la perforation, s_i , surface de la perforation i , et A , amplitude pour une perforation unique. ».

En d'autres termes, si l'ouvrage étanche contient une seule perforation, celle-ci génère un certain signal de fuites. Si le bassin contient deux perforations de même taille (même humidité du sol, même distance de l'électrode positive), le signal de fuites devrait être divisé par 2. Si la surface d'une des perforations est cent fois la surface d'une deuxième fuite, la plus petite ne générera qu'un centième du signal idéal possible. Les fuites importantes diminuent la sensibilité de la détection de fuites, de même que les voies d'accès de camions ou le recouvrement en haut de talus lors qu'il n'y a aucune isolation électrique en périphérie.

L'impact d'une perforation unique dans un ouvrage isolé électriquement et un graphique de la réponse de la fuite en différentiel sont présentés sur les figures 4 et 5. Dans cet exemple, on peut observer que la perforation a généré une distorsion importante du voltage dans le recouvrement. Le graphique en absolu montre l'électrode positive représentée par la zone rouge. La tension de source prend une forme exponentielle localement, puis se répand dans le recouvrement uniformément (faible variation, zone bleue). La tache bleu foncé est provoquée par la perforation, on peut voir que la tension est sensiblement de même amplitude autour de la fuite, ce qui explique les différences de potentiel positives et négatives lorsqu'une série de lectures est prise de part et d'autre de la perforation.

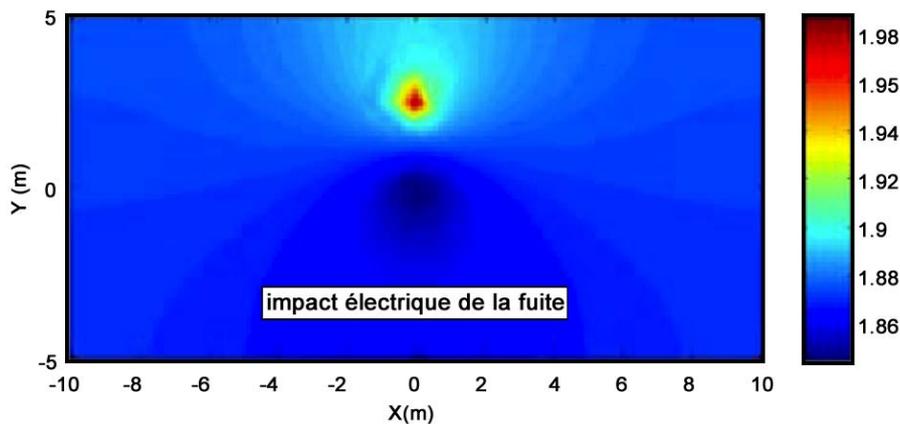


Figure 4. Schéma d'impact électrique d'une fuite unique en absolu

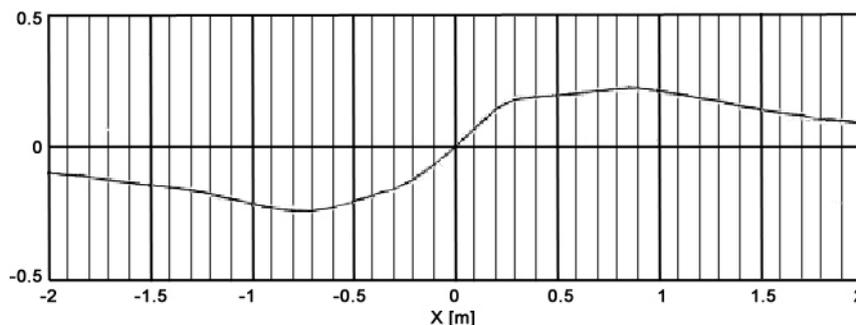


Figure 5. Réponse électrique d'une fuite unique en différentiel

L'impact d'un site avec une voie d'accès de camions et l'effet sur cette même fuite ont été obtenus par simulation numérique. L'impact dans l'ouvrage et un graphique de la réponse de la fuite en différentiel sont présentés sur les figures 6 et 7.

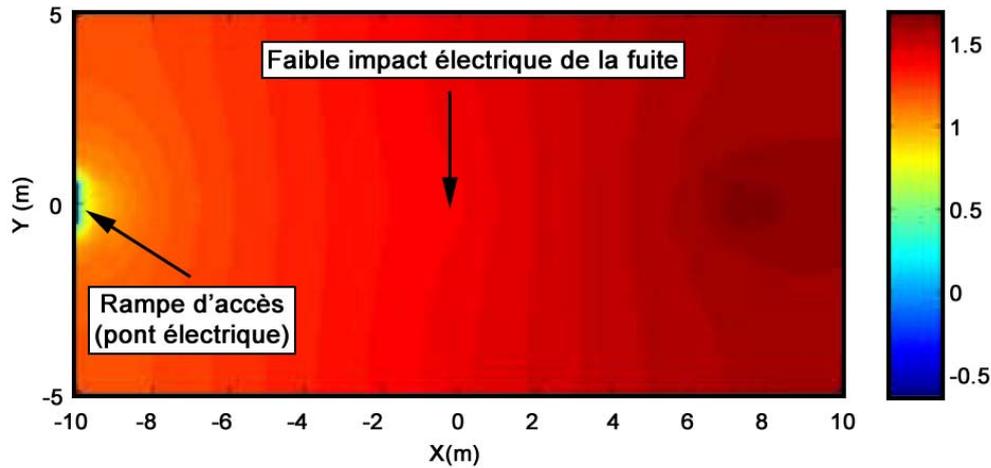


Figure 6. Schéma d'impact électrique d'une fuite par rapport à une voie d'accès de camions en absolu

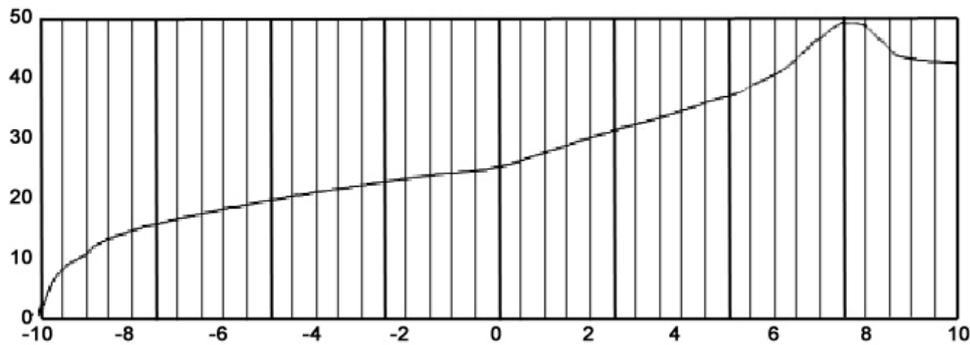


Figure 7. Réponse électrique d'une fuite dans un bassin comportant une voie d'accès de camions en différentiel

Il est clair que la fuite n'offre pas autant de distorsion de signal que dans le premier cas. Sur le graphique, la variation de différentiel aux environs de la fuite (distance 0) est complètement négligeable par rapport au signal de fond. Lorsqu'une importante partie du courant est drainée vers un pont électrique, le changement de signe généré par une fuite s'estompe rapidement et rend la fuite indétectable.

4. Test pratique à échelle réduite

Une maquette de dipôle a été conçue dans le but de vérifier expérimentalement les résultats de l'analyse théorique par éléments finis. Le bassin miniature a été réalisé à l'aide d'une géomembrane PeHD de 2 mm d'épaisseur installée sur une assise de sable fin et recouverte du même sable. Une perforation de 3 mm² de diamètre était présente dans un des coins, et un dipôle espacé de 10 cm mesurait les variations de différentiel. Comme un changement de polarité est un indice clair d'une présence d'une perforation, le test pratique vise à vérifier à partir de quelle taille de voie d'accès le signal de fuite réelle sera masqué (le moment où la fraction du courant drainé par la voie d'accès sera trop importante par rapport à la signature de fuites).

La première étape fut de localiser la position exacte du maximum négatif pour un signal normalement positif lorsqu'aucune fuite n'est présente. Le dipôle a été fixé à cette position pour éviter toutes

perturbations dues à un changement de contact électrique (résistance de contact) ou de localisation. Une voie d'accès fut ajoutée à égale distance de l'électrode positive pour en vérifier l'influence aux environs de la perforation. Les résultats sont présentés à la figure 8. L'échelle de gauche montre la différence de voltage maximale négative. L'échelle du haut représente la surface de voie d'accès par rapport à la surface de fuite (3 mm²). Les quatre tests démontrent que les courbes sont les mêmes quelle que soit la tension de la source, seule l'amplitude varie.

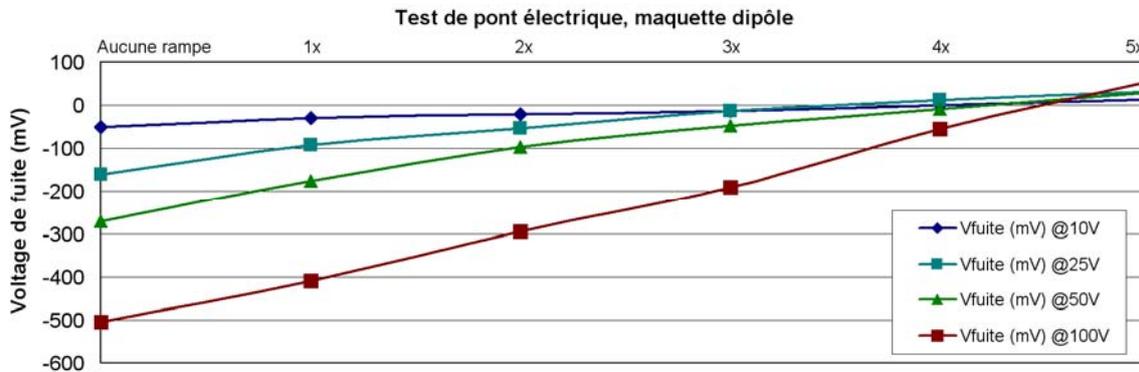


Figure 8. Test sur maquette pour vérifier l'influence d'une voie d'accès sur un signal de fuite

La première conclusion à tirer de ce graphique est que, plus la tension de source est élevée, plus les fuites sont visibles car plus les amplitudes des signatures de fuites se démarquent par rapport au bruit de fond. Ensuite, dès que la rampe d'accès (sortie électrique) a une surface cinq fois plus grande que la fuite, cette dernière est masquée et la tension reste du même signe. Cela démontre à quel point l'impact électrique d'un site mal isolé peut diminuer la précision de la méthode.

Les surfaces de perforation et de rampe d'accès de camions sont très petites vu la taille de la maquette, le rapport des surfaces est plus important. Pour donner un exemple plus concret, une voie d'accès de 4 m de largeur par 50 cm d'épaisseur, soit une surface de contact de 2 m² est retenue. Dans les mêmes conditions que celles de la maquette, une perforation d'une surface plus petite ou égale à 40 cm² sera très difficile à détecter sans la présence de changement de signe lors de la prospection par dipôle. La simulation numérique a confirmé ce principe. Plusieurs autres facteurs doivent être pris en compte, comme la distance de l'électrode positive, la nature des matériaux, l'humidité du recouvrement.

5. Application

Tel que présenté précédemment, dans le cas d'un ouvrage étanche ne comportant aucune perforation, le courant électrique serait « emprisonné » à l'intérieur de la couche de recouvrement avec 0 ampère de courant global. Si une seule perforation était présente dans le site, une bonne partie du courant provenant de l'électrode positive s'y dirigerait directement et créerait de fortes lignes de courants. Pour un ouvrage étanche comportant deux perforations de même taille situées à une même distance de l'électrode positive, le courant de fuites serait alors divisé en 2.

Pour des perforations de taille différente, le pourcentage du courant de fuites distribué dans chacune serait alors proportionnel à leurs tailles (ou à la facilité à laisser passer le courant, leur conductivité électrique). Il faut noter que le signal de fuites lu par l'opérateur de dipôle est une différence de potentiel (tension) créée par le passage du courant électrique au travers d'une perforation. Plus il y a de fuites, plus le courant individuel de chaque fuite est amoindri, et donc plus la tension lue par l'opérateur est faible. Une perforation de petite superficie située près d'une perforation de grande dimension peut alors être masquée au niveau de l'amplitude du signal de fuites car la perforation de grande dimension draine beaucoup plus de courants que la petite. Plus il y a de perforations, plus les perforations de petite dimension sont difficiles à localiser.

Pour un ouvrage étanche bien isolé électriquement comportant deux perforations à même distance de l'électrode positive, la première fuite ayant une surface de 1 mm et la deuxième 99 mm, seulement 1 % du signal de fuites traversera le premier trou, alors que la majorité du courant se dirigera vers la seconde perforation.

Une voie d'accès de camions permet le passage du courant électrique à partir du recouvrement vers l'extérieur du site, là où l'électrode négative est placée, de telle sorte qu'une perforation de faible

dimension localisée près d'une voie d'accès de camions peut être masquée par l'effet électrique causé par cette autre sortie électrique. La surface de passage aura également un effet majeur sur le système : plus la voie d'accès de camions sera large et épaisse, plus elle permettra le passage du courant global et appauvrira le courant individuel des petites fuites.

Pour les ouvrages de cellules d'enfouissement des déchets, plusieurs situations sont considérées comme des sites classiques non isolés électriquement :

- *Sites dont le recouvrement monte sur les talus jusqu'à la clé d'ancrage* : lorsque le recouvrement rejoint le haut des talus et touche l'extérieur de la cellule, les lectures dépendront de plusieurs facteurs, dont le taux d'humidité du recouvrement, celui du matériau qui se trouve sous la géomembrane (nature de l'assise), de la superficie de l'ouvrage et bien d'autres. La précision ultime est assurée lorsque l'étanchéité de la cellule est assurée par une géomembrane avec un recouvrement en fond et un géotextile sur les talus.

- *Fermetures de cellules dont le recouvrement touche au sol extérieur* : ces cas sont généralement complexes à isoler électriquement compte tenu de la compaction et de la façon de remonter le recouvrement du bas vers le haut. Lors de la création d'une cellule neuve, le recouvrement se dépose sur le fond, puis sur les talus en montant. Dans le cas d'une fermeture d'une cellule pleine, le recouvrement se fera encore du bas de talus jusqu'en haut, puis sur le plat au sommet. Il est risqué d'isoler électriquement la cellule en creusant une tranchée en pied de talus. Une des solutions possibles est l'aménagement progressif de cette voie en montant la voie d'accès des camions sur le talus depuis le pied pour en prospecter cette surface avant d'installer la couche de recouvrement sur le plat et de valider cette zone au dipôle, puis terminer le recouvrement des pentes en faisant le raccordement des couches.

- *Sites comportant une voie d'accès de camions* : lorsque le recouvrement est terminé sauf la bordure du site, il est aisé de creuser un fossé latéralement à la voie d'accès pour la découper en deux sections. Par contre, il est fréquent que les travaux persistent lors de la prospection par dipôle. Dans un tel cas, il est suggéré d'utiliser une pièce de géomembrane comme isolant en la plaçant à la verticale jusqu'à ce qu'elle déborde par le haut de la voie d'accès (environ 15 cm). De cette manière, la voie d'accès est bien solide et praticable, sans laisser traverser le courant (voir figure 9).

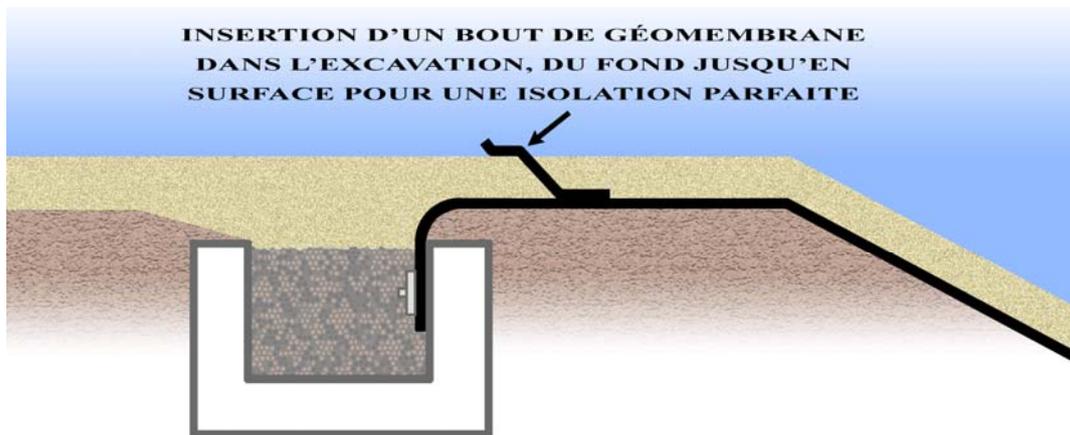


Figure 9. Exemple de voie d'accès coupée

- *Sites avec des traversées de membrane (un drain au point bas, des sondes branchées, etc.)* : au sein d'une couche étanche, il est fréquent de prévoir à la conception plusieurs pénétrations de membranes, chacune constituant un pont électrique. Ainsi le cas d'une perforation de 8 mm situé à proximité d'un drain de 3 m par 3 m en béton avec une pompe en acier inoxydable. Lors de la détection de fuites, une infime partie du courant va se dissiper au travers de la perforation, alors que la majorité du courant va passer au travers de la zone de béton et d'acier. Bien que cette section soit étanche au liquide, elle laisse traverser le courant et génère un signal de fuites, en plus d'appauvrir le courant global. Il est recommandé de creuser un fossé autour des puits, des drains métalliques et des structures de béton reliés à l'extérieur du site, et de débrancher les appareils électriques qui pourraient être reliés à la masse (*ground* électrique).

6. Conclusions

Il est évident que l'isolation électrique influence beaucoup la sensibilité de la méthode du dipôle sans négliger non plus la conductivité électrique des sols en contact. L'utilisation consciencieuse de simulations de fuites adéquates permet à l'opérateur expérimenté sur le terrain de vérifier l'applicabilité de la méthode selon les paramètres propres au terrain, et ainsi connaître d'avance la taille des fuites qu'il est possible de détecter. Il est généralement aisé de contrôler les différents paramètres d'un site en construction afin d'en optimiser l'isolation électrique, le reste n'est qu'une question de coûts.

Par contre, que faire sur un site en utilisation sans isolation électrique? La méthode reste praticable et précise selon certaines conditions telles qu'un recouvrement avec une grande résistivité électrique (par exemple, de gravier), une température chaude et sèche depuis quelques jours afin de sécher le recouvrement sur les parois, une alimentation en eau afin d'humidifier le fond du bassin et créer ainsi une zone conductrice entourée de parois sèches et très résistantes au courant électrique.

Le dernier facteur à prendre en compte est le rapport des résistivités électriques des couches sur et sous la géomembrane. Plus la résistivité sous la géomembrane est basse par rapport au recouvrement, plus le courant d'injection aura tendance à traverser les fuites plutôt que les parois ou les ponts électriques.

L'isolation électrique d'un ouvrage étanche est une nécessité pour une détection précise de fuites. L'expérience des opérateurs et la qualité de l'équipement utilisé sont vitales pour bien contrôler tous les paramètres qui influencent la localisation des fuites sur le terrain. Seule une bonne compréhension de ce phénomène amènera les professionnels à améliorer la conception des ouvrages étanches pour faciliter la détection géoélectrique.

7. Références bibliographies

- ASTM D7007. Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials.
- Chouteau M. (2006). Modélisation de la réponse électrique d'un bassin. *Rapport interne SOLMERS, École Polytechnique de Montréal, Canada.*
- Darilek G.T., Laine D., Parra J.O. (1989). The electrical leak location method for geomembrane liners. *Proceeding of Geosynthetics' 89, IFAI, p. 456-462, San Diego.*
- Jacquelin T., Bone C., Marcotte, M., Rollin, A.L. (2008). Recent results in geoelectrical leak location in the Chilean mining industry. *Proceedings, GeoAmerica 2008, Cancun, p. 1557-1562.*
- Nosko V., Touze-Foltz N. (2000). Geomembrane liner failure: Modeling of its Influence on containment transfer, *Proceedings Second European Geosynthetics Conference, Bologna (Italie), pp. 557-560*
- Peggs I.D., Pearson D.L. (1989). Leak detection and location in geomembrane lining systems. *ASCE Annual meeting, Fort Lauderdale.*
- Phaneuf R., Peggs I.D. (2001). Landfill construction quality: lessons learned from electrical resistivity testing of geomembrane liners. *Geotechnical Fabrics Report, vol 19, no. 3, p. 28-35.*
- Rollin A.L., Marcotte M. (2007). Impacts of CQA Programs on geomembrane integrity in landfills – Statistical study based on a decade of leak location surveys, *7th French, Japan and Korean Conference, May, Grenoble (France).*
- Rollin A.L., Jacquelin T., B. Forget, Saunier P. (2004). A guide to detect leaks on installed geomembranes, *Proceedings EuroGEO, Munich, p. 235-240.*