**Auscultation non destructive des digues par la méthode du potentiel spontané**

**A. Soueid Ahmed1, B. Steck2, C. Vergniault3**, **A. Revil1, A. Bolève4**

(1) Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, France

(2) EDF R&D, 6 quai Watier, 78400 Chatou, France

(3) EDF DI-TEGG, 905 avenue du Camp de Menthe, 13097 Aix-en-Provence, France

(4) FUGRO, Savoie Technolac, Le Bourget-du-Lac Cedex, France

**Abstract**

The SP method is a passive geophysical method that measures the fluctuations of the electric field generated by the water flow in porous media. Indeed, thanks to its cost effectiveness and its high sensitivity to water flow, the SP method appears as a promising technique for detecting leaks in dams. We present here a methodology for characterizing the seepage flow paths in dams using the SP method.

**1. Introduction**

Les écoulements d’eau dans un milieu poreux génèrent un courant électrique appelé courant électrocinétique. Ce courant électrique est associé à un champ électrique appelé potentiel spontané. Les fluctuations du champ de potentiel spontané peuvent être mesurées en utilisant des électrodes non polarisables. La méthode géophysique qui s’intéresse à la mesure de ces fluctuations, est dite la méthode du Potentiel Spontané (PS). Elle est l’une des rares méthodes à être très sensible aux flux hydriques, relativement peu coûteuse et facile à mettre en œuvre car elle ne nécessite que l’utilisation de deux électrodes non polarisables que l’on connecte à un voltmètre. De ce fait, la méthode PS est un outil intéressant pour la détection des fuites dans les digues et les barrages. Par exemple, Al-Saigh et al. (1994) ont utilisé la méthode PS afin de détecter les zones de fuite dans un barrage. Ils ont délimité une zone de fuite qui générait une anomalie PS dont l’amplitude avoisinait les 120 mV. Panthulu et al. (2001) ont combiné la méthode de résistivité et celle du potentiel spontané dans le but de détecter les fuites au sein d’une digue bâtie sur un milieu rocheux hautement hétérogène en Inde. La méthode PS leur a permis d’identifier des chemins préférentiels d‘écoulement dans la structure de la digue, qui généraient des anomalies PS ayant des amplitudes allant de 10 à 15 mV. Récemment, Soueid Ahmed et al. (2019) ont implémenté un modèle numérique 3D pour simuler les signaux de potentiel spontané d’origine électrocinétique. Ils ont montré sur une digue expérimentale l’importance que peut avoir la modélisation numérique dans la compréhension et l’interprétation des signaux de potentiel spontané. Cependant, comme soulevé par Sheffer and Oldenburg (2007), l’interprétation des données PS peut se révéler difficile, d’où la nécessité de développer des outils numériques capables d’aider à mieux comprendre les anomalies PS observées et en tirer le plus d’informations pertinentes concernant les écoulements anormaux dans les ouvrages hydrauliques. Plusieurs questions se posent : (i) En amont d’une campagne, peut-on définir les gammes de fuite détectables dans un contexte donné afin de vérifier que le rapport coût bénéfice justifie la reconnaissance ? En aval d’une campagne, dans le cas de la présence d’une fuite dans un barrage hydraulique, comment peut-on interpréter les données de PS afin d’estimer les propriétés hydrauliques du chemin d’écoulement préférentiel associé à cette fuites (c.à.d., perméabilité et vitesse d‘écoulement) et leur sensibilité. Nous proposons dans cette contribution, de répondre à ces questionnements, par le développement d’un outil de modélisation stochastique inverse basé sur les chaînes de Markov (c.f., Haario et al., 2006; Hastings, 1970; Metropolis et al., 1953; Sambridge and Mosegaard, 2002). Notre modèle permet d’estimer les propriétés hydrauliques des chemins préférentiels à partir des données PS observées sur une digue ou un barrage. Il prend en entrée la géométrie de l’ouvrage ainsi que la perméabilité et la résistivité de chacun de ses structures. nous effectuons également une étude de sensibilité sur la perméabilité du chemin préférentiel d’écoulement dans la fondation d’une digue donnée afin d’évaluer le rôle que joue cette grandeur sur les signaux PS observés sur celle-ci. Notre étude porte sur un barrage hydroélectrique en Afrique équatoriale et sur lequel Fugro a effectué à la demande d’EDF une vaste campagne de potentiel spontané et de tomographie de résistivité électrique.

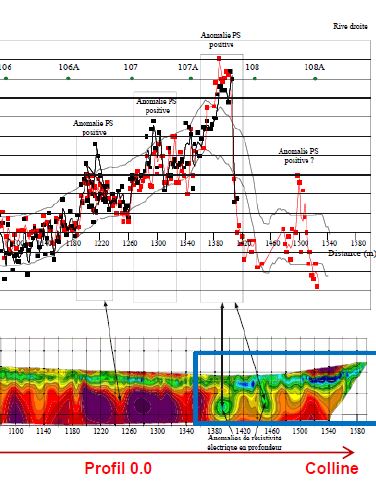
**2.Site d’étude**

La portion du barrage étudiée est une digue kilométrique fermant un col. Elle est composée d’un noyau en latérite et repose sur un substratum cristallin, avec des niveaux plus ou moins altérés ou fissurés. La mise en eau de ce barrage fut réalisée en 1987 et sa retenue contient un volume de 2 km3. Les campagnes géoélectriques (PS et résistivité électrique) réalisées sur le barrage ont permis d’identifier dans la rive gauche de l’ouvrage des zones à faible résistivité et reflétant des anomalies PS positives (voir Figure 1). Ces zones sont susceptibles d’être des zones de résurgence. Nous proposons d’utiliser le modèle numérique afin de mieux caractériser les propriétés de ces deux zones, à savoir :

- La zone 1 située entre les abscisses 1380 m et 1460 m (entre les repères 107A et 108).

- La zone 2 située entre les abscisses 940 m et 980 m (entre les repères 105 et 105A).

Nous allons nous focaliser sur la zone 1 (voir Figure 1).

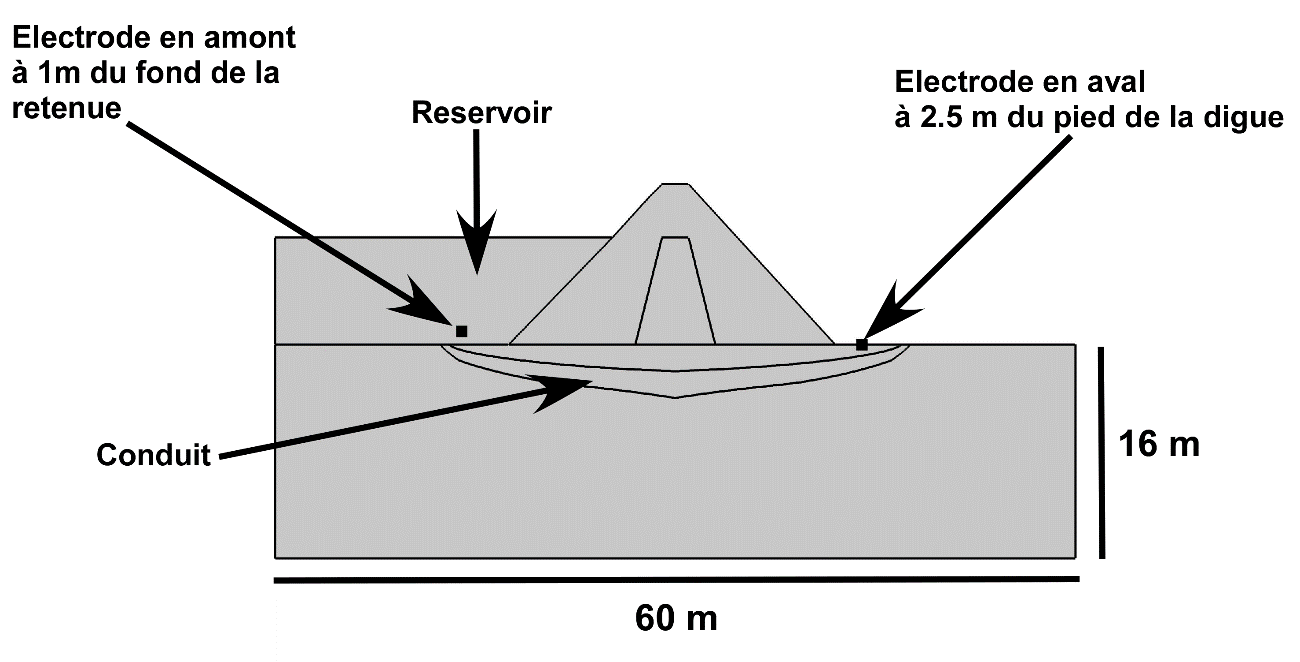


**Figure 1**. Zone 1 de la digue de Nangbéto rive gauche

En effet, cette zone montre la plus grande anomalie PS (de +30 mV à +35 mV) en aval (en pied de digue). L’amplitude de l’anomalie PS en amont, c’est-à-dire dans l’eau, à 1 m du fond de la retenue est de l’ordre -5 mV. Le niveau d’eau de la retenue est de 4 m.

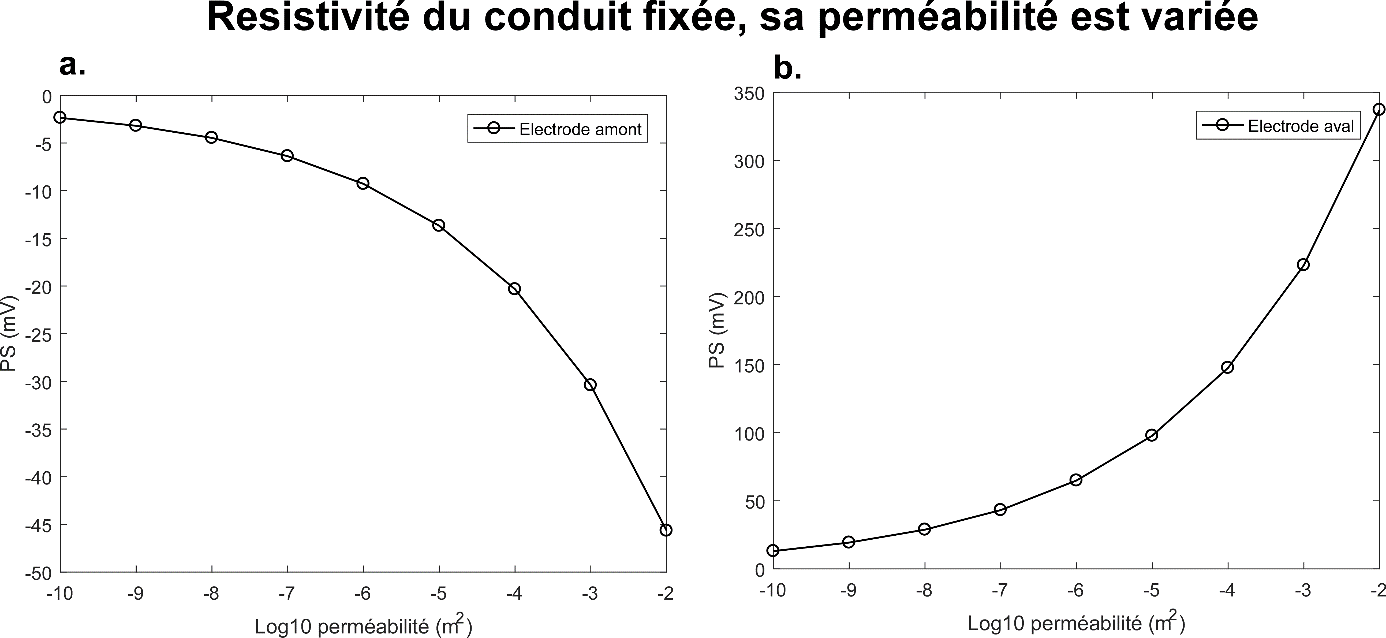
**3. Estimation de la perméabilité du chemin préférentiel**

L’étude de sensibilité réalisée, consiste à faire varier la perméabilité du conduit d’écoulement préférentiel afin de pouvoir reconstruire les amplitudes des anomalies PS mesurées sur le terrain. Pour ce faire, nous modélisons le barrage en utilisant la géométrie illustrée sur la Figure 2. Les données PS ont été enregistrées en amont en eau à 1 m du fond de la retenue et en aval en pied de digue à environ 2.5 m de la digue.



**Figure 2.** Géométrie du domaine de simulation.Les différents éléments de la digue modélisés par le modèle sont représentés.

Le tomogramme de résistivité électrique met en évidence une anomalie conductrice d’environ 400 Ohm.m (voir Figure 1). Nous attribuons cette valeur de résistivité électrique au chemin préférentiel supposé et nous faisons varier sa perméabilité dans la gamme de valeurs : [10-10, 10-9, 10-8, 10-7, 10-6, 10-5, 10-4, 10-3, 10-2] exprimées en m2. Le résultat d’une telle étude de sensibilité est illustrée sur la Figure 3. Nous voyons que la valeur de perméabilité permettant de reproduire les anomalies PS observées (soit -5mV en amont et 30 mV en aval) se situe autour de 10-8 m2. Afin de vérifier la véracité de cet ordre de grandeur par un autre moyen, nous lançons une inversion McMC des propriétés hydrauliques du chemin préférentiel. Les inconnues du problème inverse sont la perméabilité du chemin préférentiel ainsi que la pression de sortie d’eau c’est-à-dire dans la zone de résurgence. L’algorithme inverse a convergé après 30000 itérations et 12 h de calcul sur un ordinateur à 32 cœurs. La valeur de perméabilité estimée est de 5 10-9 m2 et la pression en aval est de 982 Pa. En effet, cette valeur de perméabilité se situe bien dans l’ordre de grandeur de celle prédite à travers l’étude de sensibilité. Par ailleurs, nous remarquons que les valeurs de perméabilité et de pression reconstruites lors de la modélisation inverse permettent de retrouver les valeurs de données PS observées sur le terrain, soit autour de -5 mV à 1m du fond de la retenue et autour de +30 mV en aval dans la zone en aval en pied de digue (Figure 4a).



**Figure 3.** Etude de sensibilité sur la perméabilité du conduit**. a.** Signal PS simulé en amont. **b.** Signal PS simulé en aval.

Le coefficient de corrélation entre les données PS observées et simulées est de 0.9, montrant ainsi que l’algorithme inverse a très bien reconstruit les données PS observées sur la digue. De même, la représentation de la distribution du potentiel spontané (voir Figure 4b) montre clairement une anomalie négative en amont et une anomalie positive en aval avec l’ordre de grandeur observé sur le terrain. Une fois la perméabilité obtenue, nous pouvons calculer la vitesse d’écoulement au sein du conduit, que nous avons évaluée à 0.019 m/s.

|  |  |
| --- | --- |
| Figure 4. Signal PS . **a**. Signal PS observé VS signal simulé. **b.** Distribution du champ de PS. | **4.Conclusion**  La méthode du potentiel spontané étant une méthode géophysique passive et facile à mettre en œuvre, est très prometteuse pour l’auscultation non destructive à grande échelle des barrages et des digues. Nous avons développé une stratégie d’inversion qui permet de mettre en évidence la présence d’une fuite dans un ouvrage hydraulique et d’estimer les propriétés hydrauliques du chemin préférentiel d’écoulement associé à la présence d’une telle fuite au sein de l’ouvrage ou dans sa fondation. Cette étude montre le rôle important que joue la modélisation numérique dans l’interprétation des données de potentiel spontané dans le but de fournir un outil non destructif d’auscultation des ouvrages hydrauliques. |

**Références**

Al-Saigh, N.H., Mohammed, Z.S., Dahham, M.S., 1994. Detection of water leakage from dams by self-potential method. Engineering Geology 37, 115–121. https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90046-9

Haario, H., Laine, M., Mira, A., Saksman, E., 2006. DRAM: efficient adaptive MCMC. Statistics and computing 16, 339–354.

Hastings, W.K., 1970. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications.

Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E., 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. The journal of chemical physics 21, 1087–1092.

Panthulu, T.V., Krishnaiah, C., Shirke, J.M., 2001. Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. Engineering Geology 59, 281–295. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00082-X

Sambridge, M., Mosegaard, K., 2002. Monte Carlo methods in geophysical inverse problems. Reviews of Geophysics 40, 3-1-3–29.

Sheffer, M.R., Oldenburg, D.W., 2007. Three-dimensional modelling of streaming potential. Geophysical Journal International 169, 839–848.

Soueid Ahmed, A., Revil, A., Steck, B., Vergniault, C., Jardani, A., Vinceslas, G., 2019. Self-potential signals associated with localized leaks in embankment dams and dikes.

**Mots clefs : digues, potentiel spontané, inversion, modélisation numérique, fuites.**