

# **CONTRIBUTIONS A L'ETUDE DE PROPRIETES HYDRAULIQUES ET ELECTRIQUES DES MILIEUX POREUX**

par Alexis Mainault

Aujourd'hui, la pression démographique croissante et le réchauffement climatique global soulèvent au moins deux problèmes cruciaux, à savoir la gestion de la ressource en eau d'une part, et la réduction des émissions de gaz à effet de serre et le développement d'énergies non productrices de CO<sub>2</sub>, comme le nucléaire, d'autre part. La géophysique de subsurface, qui apporte des mesures denses en espace et en temps de façon non destructrice, peut contribuer à ces problématiques. Par exemple, concernant la caractérisation de la ressource en eau, et donc des écoulements en milieux poreux, la méthode du suivi du potentiel spontané (PS), potentiel électrique naturellement présent dans la subsurface, a un intérêt certain, en ce sens que le PS est sensible aux écoulements. Pour ce qui concerne le second point, il faut par exemple découvrir de nouveaux gisements d'uranium, mais aussi penser à la surveillance des sites de stockage des déchets nucléaires. On peut également réduire les émissions de CO<sub>2</sub> au moyen du stockage géologique, et là-aussi il faudra surveiller les sites. Pour ce faire, le PS, mais aussi la méthode de la polarisation provoquée (PP) se révèlent utiles, à condition que l'on comprenne bien le lien entre les observables géophysiques et les phénomènes physico-chimiques. Cela nécessite non seulement des études théoriques, mais aussi leur validation sur échantillons ou analogues de laboratoire, ou bien encore par simulations numériques.

Depuis 2006, j'ai donc étudié les réponses en PS et en PP de milieux naturels, et leurs liens avec les propriétés hydrauliques de ces milieux, à la fois sur le terrain, en laboratoire, et par simulations numériques. Les objets que j'ai étudiés sont assez variés, mais tous peuvent se rattacher aux deux problématiques exposées ci-dessus.

## **Potentiel spontané**

Il faut tout d'abord savoir que la méthode du PS peut parfois ne rien donner, comme l'a montré une étude sur un roll-front uranifère de faible profondeur situé en Mongolie (thèse d'E. Williard). Si la cartographie de PS est en corrélation avec les linéaments magnétiques de la zone, la méthode n'a en effet pas permis d'identifier le roll-front. La méthode a également été testée, dans une optique de surveillance, sur une cellule de production d'uranium par lixiviation, là-encore sans résultats. Mais, en corollaire inattendu de ce travail, j'ai implémenté une procédure pour estimer la distribution de potentiel électrique le long du casing métallique d'un puits, à partir d'un simple profil de PS en surface – potentiel qui pourrait être indicateur de l'état de corrosion.

Heureusement, le PS peut aussi produire des résultats assez inattendus. J'ai ainsi acquis des mesures continues de PS dans un puits horizontal dans l'argile à Opalinus du laboratoire souterrain du Mont-Terri, dédié à l'étude du stockage des déchets nucléaires. Suite à des activités de forage près du puits, de fortes variations du PS ont été observées, probablement liées à des arrivées d'eau porale circulant dans des fractures réactivées par ces activités.

J'ai également mesuré le PS en surface sur le terrain lors de tests de pompages harmoniques (qui consistent à déterminer les propriétés de l'aquifère à partir de l'étude de l'amplitude et du déphasage d'une onde sinusoidale de pression hydraulique appliquée depuis un puits d'injection). Si les signaux sont de faible amplitude, ils sont cohérents et surtout non

harmoniques, ce qui n'est pas expliqué par la théorie actuelle du PS. La composante non-linéaire du signal est peut-être la réponse aux phénomènes de saturation-désaturation qui se produisent dans la zone non-saturée au-dessus de l'aquifère, comme le laisse supposer un travail de modélisation.

Pour vérifier cette hypothèse, j'ai mis au point un dispositif permettant de produire des cycles de saturation-désaturation dans une colonne verticale remplie de sable, pour simuler des battements de nappe et en étudier la réponse en PS. Les expériences réalisées (post-doctorat de V. Allègre) ont montré un déphasage et une non-linéarité entre la pression hydraulique et le signal électrique. Le signal ne peut être correctement modélisé qu'en introduisant un terme empirique supplémentaire dans les équations.

Enfin, toujours en laboratoire, des expériences ont été réalisées pour voir si le PS pouvait détecter des arrivées de panaches de CO<sub>2</sub> en surface (thèse de C. Vieira). La réponse est oui, même si les signaux sont relativement erratiques.

### **Polarisation provoquée**

La PP peut parfois ne rien donner, elle aussi. Ainsi, sur le cas du roll-front uranifère de Mongolie (thèse E. Williard), des mesures de terrain et des mesures sur échantillons ont été réalisées, qui montrent que dans le contexte étudié la méthode est inefficace, la cible recherchée ne polarisant pas.

J'ai ensuite étudié l'applicabilité de la méthode de la PP spectrale (PPS) pour la détection de panaches de gaz dans le contexte du stockage du CO<sub>2</sub> (thèse T. Kremer). Des mesures en laboratoire ont été effectuées, lors de la circulation de N<sub>2</sub> (gaz inerte) et de CO<sub>2</sub> (gaz réactif) dans du sable quartzeux (inerte) et du sable carbonaté (réactif). Le CO<sub>2</sub> présente une signature bien différente du N<sub>2</sub>, particulièrement dans le sable carbonaté. Dans ce cas, la dissolution du CO<sub>2</sub> et de la calcite entraîne une forte augmentation des conductivités en phase et en quadrature, cette dernière variant plus que la première, ce qui montre l'intérêt de la PPS par rapport aux méthodes électriques classiques, qui ne mesurent que la première.

Plus récemment, je me suis intéressé à la question du changement d'échelle de la réponse en PPS. En effet, s'il existe des modèles théoriques à l'échelle du pore et des modèles empiriques ou semi-empiriques à l'échelle de l'échantillon voire du terrain, il n'existe pas de méthode qui permette de faire le lien entre les deux. Pour cela j'ai utilisé la méthode des simulations sur réseaux de tubes. Je montre ainsi qu'on peut reproduire correctement des observations faites sur échantillons, et que la réponse globale du milieu est fortement dépendant de son hétérogénéité en terme de distribution de rayons des tubes. Enfin, j'ai implémenté une procédure permettant de simuler le drainage et l'imbibition sur ces réseaux, et de calculer la réponse PPS associée. J'ai mis en évidence une évolution hystérétique des paramètres PP, et que la fréquence du pic de phase était directement liée à la perméabilité relative, ce qui montre l'intérêt de la méthode PPS pour la caractérisation des milieux non saturés.

### **Propriétés de transport des milieux poreux**

Enfin, je me suis aussi intéressé aux propriétés de transport des milieux poreux. J'ai ainsi établi une procédure pour interpréter des mesures de déplacements miscibles sur des échantillons de roches, comprenant notamment l'évolution de la résistivité moyenne de l'échantillon. Je montre que prendre en compte ce paramètre en plus de la concentration en sortie (« breakthrough curve » classique) permet de mieux contraindre l'estimation de la dispersivité hydraulique. J'ai également appliqué la méthode des réseaux de tubes pour l'étude de la perméabilité, du facteur de formation et de la tortuosité en fonction de

l'hétérogénéité du milieu.

### **Concernant mon projet de recherche**

J'ai mis en place un dispositif permettant de réaliser des écoulements dans une cuve métrique, sur lequel j'ai réalisé des mesures d'advection de fronts salins, avec mesure du PS en surface. Lorsque le milieu est saturé, j'ai obtenu des résultats similaires à ceux observés durant ma thèse. Mais lorsqu'il existe une zone non saturée, les courbes de PS sont différentes, et à ce jour je ne puis m'expliquer leur dynamique. Je compte donc continuer leur modélisation, les différents essais effectués jusqu'à ce jour s'étant montrés infructueux.

Je compte continuer le développement des simulations sur réseaux de tubes, qui ouvre de grandes perspectives pour l'étude de la PPS. Il faudra, entre autres, intégrer par exemple la conductivité de surface pour voir son effet sur la phase, étudier l'effet de la topologie des réseaux (effet de la connectivité), prendre en compte les saturations résiduelles dans le cas non saturé, implémenter le passage en trois dimensions, et surtout introduire de la physique à l'échelle du pore (polarisation de membrane, de la couche de Stern et de Maxwell-Wagner). On pourra aussi implémenter la réponse PS, afin, *in fine*, de disposer d'un simulateur général de milieu poreux, sur lequel pourront être calculés la perméabilité, la perméabilité relative, le facteur de formation, le resistivity index, la tortuosité, la réponse en PS et la réponse en PPS, voire d'autres paramètres. Cela permettra d'étudier les liens entre toutes ces propriétés, en faisant varier de façon contrôlée, puisque numérique, tous les paramètres imaginables, et donc de réaliser un très grand nombre d'expériences virtuelles, ce qui n'est pas faisable sur échantillons.

Enfin, si l'étude de ce qui se passe à l'échelle du pore, puis de l'échantillon, a un intérêt en soi pour comprendre les phénomènes, les applications finales concernent le terrain. Pour savoir si les relations déterminées à petite échelle sont valables à grande échelle, il faudra faire des expériences sur des site-tests.