

Résumé de thèse

Eric Lalot

Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières – Application au Rhône

Ce travail de thèse est consacré à l'analyse des interactions hydrauliques entre le fleuve Rhône et la nappe alluviale. La dynamique des échanges entre eaux de surface et eaux souterraines est étudiée à l'aide de deux grands types d'outils : une analyse des signaux piézométriques, à l'aide de différentes techniques de traitement du signal, et une mise en œuvre de modèles numériques déterministes à base physique. La complémentarité des résultats obtenus avec ces deux grandes catégories de méthodes est par la suite analysée.

La zone considérée correspond à la couche d'alluvions de la vallée du Rhône située entre Condrieu, au nord, et Andancette, au sud. La longueur de la zone d'étude avoisine les 22 km, selon un axe nord sud, pour une largeur comprise entre 2 et 4 km. Les alluvions possèdent une épaisseur généralement comprise entre 10 et 30 m. Le matériau alluvial est globalement très perméable avec une conductivité hydraulique qui varie de 10^{-4} m/s à 10^{-2} m/s. Le substratum est constitué par une couche argilo-marneuse très peu perméable.

La zone d'étude, fortement anthropisée, est soumise à de forts enjeux socio-économiques. On y trouve ainsi : une centrale nucléaire, de nombreux aménagements hydro-électriques, une forte concentration d'industries chimiques et une réserve naturelle. Des enjeux agricoles et d'alimentation en eau potable s'y rajoutent localement. La nappe alluviale est donc soumise à une forte exploitation et à des conflits d'usages. La masse d'eau des alluvions du Rhône est, sur la zone d'étude, considérée en déficit dans le cadre du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du Rhône.

Dans un premier temps, les données existantes : niveaux piézométriques, perméabilités, prélèvements en nappe, ont été collectées. Des campagnes de mesures complémentaires (niveaux piézométriques et températures des eaux de nappe) ont par la suite été réalisées.

Les chroniques piézométriques, incomplètes et présentant des anomalies, ont fait l'objet d'études spécifiques, afin de détecter les données aberrantes. Celles-ci ont été écartées. Les lacunes présentes au sein des séries temporelles ont, par la suite, été complétées, afin de rendre possible l'analyse ultérieure des signaux. Cette reconstitution a été effectuée par apprentissage à l'aide de modèles de comportement de type « boîte noire », linéaires et non-linéaires.

Différents tests, utilisant des techniques de traitement du signal, ont ensuite été implémentés sous Matlab, pour caractériser le comportement de la nappe phréatique alluviale :

- une analyse en composantes principales des séries temporelles de niveaux piézométriques, suivie d'une classification, dans le but de déterminer des zones de comportements homogènes au sein de la nappe et afin d'identifier les principaux facteurs explicatifs de la variabilité des niveaux de nappe ;
- des analyses corrélatoires et spectrales, pour caractériser la relation existant entre le niveau d'eau des cours d'eau et les niveaux piézométriques. L'atténuation et la vitesse de propagation des ondes de crues, lors de leur transfert dans la nappe, sont calculées. L'analyse corrélatoire simple est complétée par une analyse de Fourier afin d'explicitier la réponse de l'hydrosystème en fonction du contenu fréquentiel des perturbations. L'analyse en ondelettes a également été employée dans le but d'observer d'éventuelles modifications du comportement de l'hydrosystème au cours du temps.

Suite à la reconstitution partielle des signaux de niveaux de nappe, et à cause du biais introduit par cette reconstitution, des tests de robustesse des différentes méthodes employées ont également été conduits.

Parallèlement, un modèle physique déterministe d'écoulements de surface a été mis en place à partir des équations de Barré Saint-Venant (logiciel MIKE 11 - schéma de calcul aux différences finies), afin de reproduire le niveau du Rhône en tous points de la zone d'étude et en fonction du temps. Les résultats ainsi obtenus ont ensuite été introduits, en tant que conditions aux limites, dans un modèle hydrodynamique de la nappe (logiciel FEFLOW – schéma de calcul aux éléments finis) qui résout l'équation de la diffusivité en zone saturée et l'équation de Richards en zone non-saturée.

Enfin, une dernière méthode a été mise en œuvre. Elle a consisté à estimer les flux échangés entre la nappe alluviale et le fleuve à l'aide d'outils géomatiques et à partir de cartes piézométriques interpolées

Les analyses en composantes principales montrent que la variabilité du niveau du Vieux-Rhône explique la majeure partie des fluctuations de niveaux piézométriques sur l'ensemble de la plaine alluviale. Les deux principales causes de fluctuations des niveaux de nappe, sont les prélèvements en nappe et les modifications de l'apport des versants, la pluie ne jouant qu'un rôle très limité. Les classifications des coefficients de saturation, associés aux composantes principales retenues, permettent d'identifier la zone de la plaine alluviale sous influence quasi-exclusive du Rhône, la zone d'influence des principaux prélèvements, ou encore la zone dans laquelle le Rhône ne joue qu'un rôle limité.

Les analyses corrélatoires et spectrales permettent de distinguer la présence d'une propagation facilitée des ondes de pression en nappe, depuis le Vieux-Rhône, à travers les systèmes de lônes et de contre-canaux. Certaines propriétés physiques du système peuvent également être estimées (diffusivité moyenne de l'aquifère, perméabilité du fond de la rivière,...).

Les écoulements surfaciques du Rhône ont pu être modélisés assez correctement à l'aide des données disponibles ou reconstituées. Les modélisations des écoulements souterrains ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de différentes parties de l'hydrosystème : échanges entre la lône et la nappe, écoulements sous le canal de dérivation, échanges entre la nappe et le Vieux-Rhône et possibilités de sous-écoulements. Elles ont permis de confirmer certaines hypothèses formulées lors de l'analyse préliminaire des signaux piézométriques.

Des modélisations de cas plus théoriques ont également été développées. Elles ont notamment permis de montrer que, sous certaines conditions, la distance de propagation en nappe des particules fluides du cours d'eau et la distance de propagation des ondes de pression sont liées. Les conditions qui rendent possible la présence d'écoulements transverses aux cours d'eau ont également été étudiées. Enfin, l'importance de la prise en considération d'hétérogénéités au niveau des sédiments a été constatée.

En conclusion, l'analyse des signaux piézométriques a permis de mieux caractériser le fonctionnement de l'hydrosystème. Elle permet d'apporter ainsi une aide à la modélisation en détectant les principaux facteurs agissant sur la nappe. Mais elle conduit également à la formulation de questions sur le comportement de l'hydrosystème qui peuvent trouver leur réponse lors de la modélisation déterministe.

Les résultats obtenus avec les différentes méthodes ont finalement pu être comparés. Des prescriptions pour l'utilisation de ces méthodes de caractérisation des échanges nappe-rivière sont donc proposées.