

Planche 8.3 Coupes géologiques et hydrogéologiques, 2^{ème} partie: hydrogéologie

Introduction

Le but de la planche est d'illustrer de manière schématique les écoulements souterrains sous le Plateau suisse (Fig. 1). La principale difficulté liée à leur représentation réside dans le fait que les écoulements souterrains se déroulent dans un espace tridimensionnel. Afin de faciliter la compréhension des principales directions des écoulements nous avons réalisé des coupes verticales rectilignes et des cartes «en plan» correspondant à l'extension latérale de quelques aquifères particulièrement importants.

La notion de système d'écoulement souterrain

L'eau existe dans les pores et les fissures des roches jusqu'à des profondeurs de plusieurs milliers de mètres au-dessous du niveau de la mer. C'est l'eau souterraine. L'eau souterraine est en mouvement (Fig. 2): elle s'écoule depuis les régions d'infiltration (généralement les hauts du relief) vers les régions d'exutoire (correspondant, généralement, au réseau hydrographique de surface, lacs, rivières, vallées etc.). La direction moyenne du mouvement de l'eau souterraine est schématisée par les lignes d'écoulement ou le champ des écoulements. Cette direction, ainsi que la «rapidité» de l'écoulement souterrain sont exprimées, dans les cas les plus simples, par la loi de Darcy (voir «Définitions»).

D'après les études théoriques de [9], les lignes d'écoulement s'organisent, entre les régions d'infiltration et les régions d'exutoires, en systèmes d'écoulement locaux, intermédiaires ou régionaux (v. Fig. 3, illustrant les systèmes d'écoulement dans un bassin hydrogéologique théorique homogène). On comprend intuitivement que les systèmes d'écoulement forment un cadre idéal pour l'étude thermique, chimique ou isotopique des eaux souterraines. Leur connaissance, même approximative, peut donner de précieux renseignements (même si ceux-ci sont de nature qualitative) par exemple sur le transport possible de substances dissoutes dans l'eau souterraine (comme à la suite d'interactions eau-roche), à différentes profondeurs. D'après la figure 3, l'emplacement de la source des substances dissoutes par rapport aux systèmes d'écoulement locaux, intermédiaires ou régionaux, apparaît, en effet, capital. Il est important de noter que les systèmes d'écoulement souterrain hiérarchisés sont les conséquences de la structure hiérarchisée du réseau hydrographique, c'est-à-dire, des régions d'exutoire.

La «mesure directe» de la direction des écoulements souterrains en tous les points de l'écorce terrestre est matériellement impossible, l'effort nécessaire serait disproportionné. Cela signifie que la reconstruction du champ des écoulements souterrains doit être effectuée, dans la grande majorité des cas par des méthodes indirectes comme, par exemple, les modèles mathématiques (voir «Définitions»).

Écoulements souterrains dans les grands bassins hétérogènes

Dans les grands bassins hydrogéologiques, on trouve plusieurs aquifères superposés, séparés par des formations géologiques relativement peu perméables. La délimitation des systèmes d'écoulement est nettement plus difficile que dans le cas homogène de la figure 3, mais les vecteurs flux donnent des indications précieuses sur le cheminement de l'eau souterraine et sur les échanges hydrauliques entre les différentes formations géologiques. Les relations hydrauliques entre deux aquifères superposés peuvent varier de place en place: en un endroit l'aquifère supérieur peut «alimenter» l'aquifère inférieur, tandis qu'en un autre endroit, c'est l'inverse qui se produit. Ces relations, c'est-à-dire le champ des écoulements souterrains, seront déterminées par la structure du bassin (la distribution spatiale de la perméabilité des roches [3]), par la position des régions d'infiltration et par la position des régions d'exutoire (conditions aux limites).

Si les cas théoriques bidimensionnels facilitent la compréhension de la nature des systèmes d'écoulement et permettent d'entrevoir leur utilité dans les études hydrogéologiques [1], il serait encore plus important de savoir comment ces écoulements se manifestent dans les aquifères réels tridimensionnels, et quelles sont les chances de pouvoir les reconstruire ou les représenter dans ces systèmes réels.

Écoulements souterrains entre les massifs de l'Aar et de la Forêt Noire

Les coupes hydrogéologiques présentées ici indiquent de manière schématique les écoulements souterrains sous le Plateau suisse, entre le massif de l'Aar et celui de la Forêt Noire. Elles permettent d'illustrer le champ des écoulements souterrains tridimensionnels dans un volume de terrain de grande dimension. Elles représentent une des nombreuses variantes de calcul (voir légende, et Tab. 1 de la planche 8.2) du modèle mathématique réalisé dans le cadre d'une étude antérieure [5].

Dans les cas théoriques bidimensionnels, la représentation du champ des écoulements souterrains est relativement aisée, car les vecteurs flux n'ont pas de composante perpendiculaire au plan de représentation. Tel n'est pas le cas dans les systèmes réels de grande dimension où il est, pour ainsi dire, impossible de trouver un plan de représentation qui ne soit pas oblique, à un endroit ou à un autre, aux vecteurs flux (donc aux lignes d'écoulement). De plus, certains aquifères dont l'épaisseur est faible (quelques dizaines de mètres) par rapport à leur extension latérale (plusieurs centaines de kilomètres) sont particulièrement difficiles à représenter (soit dans des blocs-diagrammes, soit dans des coupes verticales). Nous avons décidé de présenter les résultats en projetant les vecteurs flux sur des coupes verticales rectilignes ou sur des cartes «en plan» correspondant à l'extension latérale de quelques aquifères particulièrement importants. Un effort supplémentaire est demandé au lecteur car en effet, il existe à chaque fois une composante de l'écoulement souterrain perpendiculaire aux plans de représentation. Il va sans dire que le passage du système réel au modèle hydrogéologique nécessite un certain nombre de simplifications dans l'élaboration de la géométrie des principales formations géologiques et des conditions hydrogéologiques choisies pour les limites du modèle.

Le modèle régional utilisé comme base pour les coupes hydrogéologiques présentées ici s'étend du massif de l'Aar au sud, jusqu'à la Forêt Noire au nord. Le lac de Constance à l'est et l'Aar à l'ouest représentent les autres limites. Les limites latérales choisies pour le modèle coïncident avec des limites de systèmes d'écoulement régionaux (vallées du Rhin, du Rhône, de l'Aar etc.) qui se manifestent jusqu'à des profondeurs considérables. Le but originel de ce modèle était d'étudier les écoulements profonds dans le Cristallin du nord de la Suisse [5,6,8,10]. La limite supérieure du modèle représente la surface de la nappe libre. Celle-ci a été estimée à partir des cartes hydrogéologiques et topographiques (représentation tridimensionnelle). Les conditions hydrogéologiques aux limites sont basées sur des valeurs observées de potentiel hydraulique ou de débit (infiltrations, exfiltrations), ou sur des valeurs estimées. Ces conditions constituent à chaque fois les hypothèses introduites dans le modèle. Il s'agira par la suite de vérifier la cohérence de ces données en analysant les résultats simulés par le modèle. Le bloc-diagramme schématique (voir légende) rend compte des simplifications apportées aux informations géologiques et aussi de l'effort dans la reconstruction tridimensionnelle de la géométrie des formations modélisées.

Tous les calculs ont été effectués en régime permanent, c'est-à-dire que les conditions imposées ne varient pas au cours du temps. Le programme FEM301 [4] est utilisé pour calculer le champ des potentiels hydrauliques et des débits dans la région simulée. Les résultats sont comparés aux valeurs observées disponibles. Il est intéressant de relever que les résultats du modèle ont pu être contrôlés, dans une certaine mesure, par des forages profonds. Plus particulièrement, les écoulements ascendants dans le voisinage des exutoires régionaux ont été effectivement mis en évidence par les mesures de potentiels hydrauliques effectuées à plusieurs profondeurs dans ces forages [2]. Les résultats obtenus permettent d'illustrer d'une façon schématique les écoulements profonds et les relations entre les aquifères les plus importants du massif de l'Aar à la Forêt Noire. Il en découle une image cohérente bien qu'approximative de la circulation des eaux souterraines dans les aquifères profonds. Nous distinguons ainsi que les relations hydrauliques entre deux

aquifères superposés peuvent varier d'une région à une autre (coupes) comme nous l'avons montré pour les cas théoriques (Fig. 2,3).

La représentation tridimensionnelle montre les zones d'affleurement des différentes formations à la surface du terrain ainsi que la position des zones d'alimentation (valeurs élevées du potentiel hydraulique) et des zones d'exutoire (valeurs basses du potentiel hydraulique situées dans les vallées représentées par le réseau hydrographique).

La coupe 3, approximativement perpendiculaire aux précédentes, réalisée à travers le modèle tridimensionnel, met en évidence les systèmes d'écoulement souterrains locaux. Ces systèmes marquent les principales zones d'exutoires dans les fonds de vallées (prépondérance des flux verticaux dans ces régions).

Écoulements souterrains dans le Cristallin, le Muschelkalk et le Malm

Pour illustrer les circulations des eaux souterraines les plus importantes sont commentées dans cette planche, à titre d'exemple, les conditions relatives à trois aquifères majeurs: le Cristallin, le Muschelkalk et le Malm. Les conditions d'écoulement dans le Cristallin (Fig. 5) et le Malm (Fig. 4) sont illustrées par deux cartes accompagnées d'un texte. Les conditions relatives au Muschelkalk sont commentées brièvement ci-dessous.

Les zones d'alimentation et d'exutoire du Muschelkalk sont liées aux zones d'affleurement, c'est-à-dire aux Alpes pour le sud et au Jura tabulaire pour le nord (voir représentation tridimensionnelle). La représentation graphique des résultats en coupe étant impossible à cette échelle, nous nous contentons des remarques suivantes. Dans les Alpes, les eaux du Muschelkalk supérieur se déchargent dans les hautes vallées de l'Aar, de la Reuss et du Rhin principalement, ainsi qu'à Vättis. Au nord, les eaux se déchargent dans la vallée du Rhin depuis Bâle jusqu'à Bad Säckingen, puis dans la vallée de la Wutach. Entre ces deux régions, l'aquifère du Muschelkalk supérieur est drainé par les vallées qui le recourent, comme celles de la Sisslen, de l'Aar et du Rhin.

Remerciements

Le présent travail a été réalisé sur mandat du Service hydrologique et géologique national, OFEFP. L'ensemble du travail est basé sur les résultats d'études mandatées précédemment par la Cédra (Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radioactifs).

Bibliographie

- [1] **Bouzelboudjen, M. (1993):** Cartographie hydrogéologique et systèmes d'écoulement souterrain. Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel – Service hydrologique et géologique national. Rapport inédit, Berne.
- [2] **Hufschmied, P., Frieg, B. (1989):** Observation of hydraulic heads in the Nagra boreholes in Northern Switzerland. Nagra Bulletin, Special Edition 39-49, Baden.
- [3] **Király, L. (1970):** L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement. In: Bulletin der Vereinigung schweizerischer Petroleumgeologen und -ingenieure, 37/91:50–57, Zürich.
- [4] **Király, L. (1985):** FEM301 – A three-dimensional model for groundwater flow simulation. Nagra Technischer Bericht NTB 84-49, Baden.
- [5] **Kimmeier, F. et al. (1985):** Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire; Partie A: Modèle régional, Partie B: Modèle local (Nord de la Suisse). Nagra Technischer Bericht NTB 84-50, Baden.
- [6] **Nagra (1988):** Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 88-25, Baden.

- [7] **Skinner, B.J., Porter, S.C. (1991):** The dynamic earth: an introduction to physical geology. Second edition, New York.
- [8] **Thury, M. et al. (1994):** Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland. Synthesis of Regional Investigations 1981–1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Program. Nagra Technischer Bericht NTB 93-01, Baden.
- [9] **Tóth, J. (1995):** Hydraulic continuity in large sedimentary basins. In: Hydrogeology Journal Volume 3, Nr. 4/1995:4–16, Hannover.
- [10] **Voborny, O. et al. (1992):** Analysis of regional groundwater flow in crystalline rocks of Northern Switzerland: Results of a numerical model using an equivalent porous medium. Nagra Interner Bericht, Baden.