HAL
open science

Les travaux souterrains : perturbations hydrodynamiques et risques de pollution

Hubert Fabriol, Emmanuel Ledoux

To cite this version:

Hubert Fabriol, Emmanuel Ledoux. Les travaux souterrains : perturbations hydrodynamiques et risques de pollution. Géosciences, 2011, 13, pp.88-93. hal-01059291

HAL Id: hal-01059291

https://brgm.hal.science/hal-01059291

Submitted on 29 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les travaux souterrains (tunnels, mines, stockages souterrains, exploitations de gisements géothermiques ou d'hydrocarbures) provoquent des discontinuités dans le sous-sol qui jouent le rôle de drain pour l'eau. Ces drains modifient les écoulements et entraînent un rabattement du niveau piézométrique des aquifères environnants. Ils modifient également les cours d'eau en surface en créant des pertes ou des résurgences. Enfin, les travaux souterrains introduisent généralement de l'air dans le sous-sol, ce qui provoque des réactions d'oxydation de la roche et modifie en conséquence la qualité de l'eau.

Les travaux souterrains : perturbations hydrodynamiques et risques de pollution

Robert Fabriol
Ingénieur géochimiste
cr.fabriol@wanadoo.fr

Emmanuel Ledoux
Directeur de recherche
École des Mines de Paris
emmanuel.ledoux@mines-paristech.fr

Effluent coulant à la base du terril du site des Farges (Limousin). La couleur rouge est due au fer en solution.

Discharge flowing at the foot of the tailings heap on the Les Farges mine site (Limousin region). The red colouring is due to iron in solution.

© R. Fabriol.

L'eau dans les roches

D'une manière générale, l'eau est toujours présente au sein des massifs rocheux en profondeur. Elle sature les interstices de la roche (pores, fissures) et occupe ainsi un volume pouvant représenter entre quelques pourcents et quelques dizaines de pourcents du volume total de la roche selon sa nature pétrophysique. La fraction volumique occupée par l'eau est appelée « porosité ». Lorsque l'eau peut circuler facilement au sein du massif rocheux, celui-ci est qualifié de perméable et constitue un aquifère. Lorsque le milieu est peu perméable, il constitue un aquitard capable d'isoler hydrauliquement, à des degrés divers, les formations aquifères les unes des autres. En règle générale, plus les roches comportent des interstices grossiers, plus elles sont perméables. C'est le cas des sables, des grès ou des roches compactes fortement fissurées. Plus les interstices sont fins, moins la roche est perméable. C'est le cas des argiles. L'hétérogénéité lithologique des formations géologiques organise ainsi le milieu

> *« Les tunnels de plusieurs dizaines de kilomètres de long recoupent inévitablement des roches aquifères et des zones faillées. »*

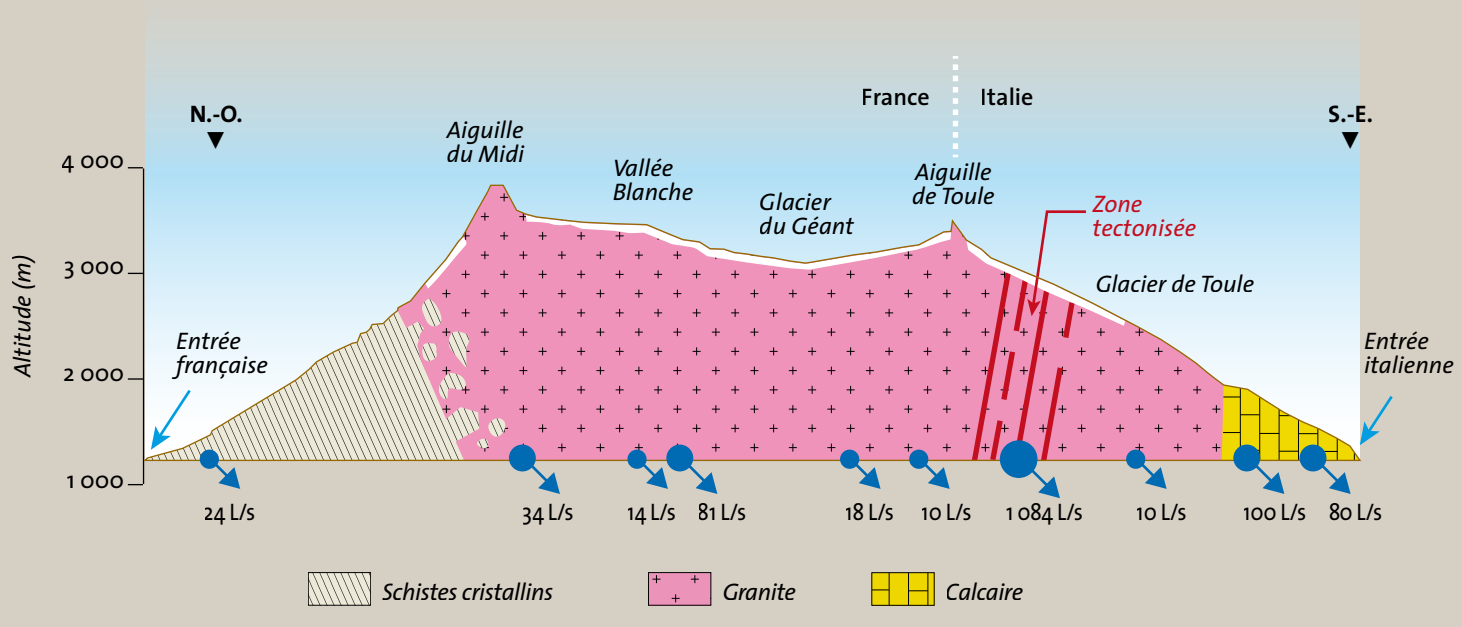


Fig. 1 : Principales arrivées d'eau rencontrées au cours du creusement du tunnel du Mont-Blanc (Maréchal, 2000).

Fig. 1: Main water inflows encountered while the Mont-Blanc tunnel was being excavated (Maréchal, 2000).

souterrain en aquifères et aquitards. La qualité de l'eau contenue dans la porosité dépend aussi de la lithologie ; elle résulte de réactions chimiques entre l'eau et les minéraux constituant la roche.

La loi de Darcy décrit les écoulements au sein d'un massif rocheux. Elle constitue une relation reliant le débit au gradient de charge hydraulique dans le milieu par l'intermédiaire d'un coefficient appelé perméabilité. La mesure de la charge hydraulique en différents points d'un aquifère au moyen de forages équipés de piézomètres associée à la connaissance de la porosité et de la perméabilité permet de quantifier l'écoulement par application de la loi de Darcy.

Impacts hydrodynamiques sur les écoulements souterrains

Rabattement de nappe lié aux tunnels (routiers, ferroviaires, hydrauliques)

La réalisation de tunnels pour le transport routier ou ferroviaire, ou pour le transfert de l'eau entre vallées, crée des drains dans les massifs rocheux traversés. Bien que les tracés soient optimisés pour minimiser les risques d'impact, les tunnels de plusieurs dizaines de kilomètres de long (Saint-Gothard 57 km, Lyon-Turin 53 km, sous la Manche 50 km, Seikan 54 km) recoupent inévitablement, suivant le contexte géologique, des roches aquifères et des zones faillées. Le creusement a pour effet de mettre l'eau contenue sous pression dans les pores ou les fractures de la roche, à la pression atmosphérique de la galerie. La conséquence est de voir apparaître, parfois brutalement, un écoulement d'eau qui peut gêner la progression des travaux voire l'arrêter. Pendant le creusement du tunnel du Mont-Blanc côté italien, de très fortes arrivées d'eau (1 m³/s) ont surpris : elles étaient liées à un grand accident tectonique subvertical inconnu à l'époque. Le débit s'est par la suite stabilisé à 0,2 m³/s ; son alimentation provient du bassin du glacier de Toule situé 2 000 mètres au-dessus *(figure 1)*.

Les arrivées d'eau très abondantes nécessitent de prendre des précautions particulières pendant le creusement. C'est le cas de la galerie hydraulique de Salazie-Amont (île de la Réunion) qui fait partie du dispositif de transfert de l'eau des cirques de Mafate et Salazie vers le littoral ouest de l'île. Au cours du creusement, sous 1 000 mètres de basaltes, l'avancement des travaux a été rendu très difficile par de nombreuses arrivées d'eau *(photo 1)* alimentées par des aquifères à forte pression hydrostatique (jusqu'à 3 MPa, équivalent d'une colonne d'eau de 300 mètres). Pour minimiser les risques liés à de telles arrivées d'eau, une reconnaissance par forages longs est réalisée à l'avancement pour caractériser les aquifères au front des travaux [Giafferi *et al.*, (2008)]. Pour diminuer le drainage dans les tunnels en réduisant la perméabilité du massif, des traitements spécifiques sont réalisés (par injection des terrains, par revêtements étanches des parois, etc.).

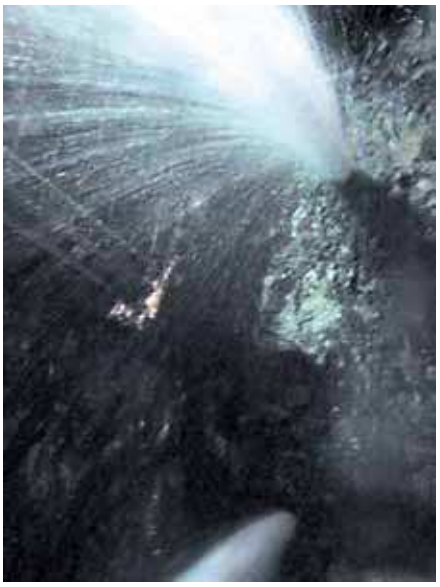


Photo 1 : Venues d'eau sous pression au cours du creusement de la galerie hydraulique de Salazie-Amont.

Photo 1: Gush of pressurized water while the Salazie-Amont hydraulic gallery was being excavated.

© J.-L. Giafferi.

Les galeries de mines ont le même effet drainant que les tunnels, avec cependant un résultat amplifié suivant le type d'exploitation.

Rabattement de nappe lié aux mines

Les galeries de mines ont le même effet drainant que les tunnels, avec cependant un résultat amplifié suivant le type d'exploitation. La technique en « chambres et piliers », qui n'affaisse normalement pas les terrains, draine efficacement la couche aquifère dans laquelle la mine est creusée, mais n'influence généralement pas, ou faiblement, les aquifères alentour. Par contre, les méthodes avec foudroyage à l'avancement ou dépilage et foudroyage, telles que celles pratiquées dans les mines de charbon et de fer en Lorraine, déstructurent les terrains sus-jacents et créent une liaison hydraulique entre les aquifères de la couverture et les vides miniers. Il en résulte un rabattement des nappes par écoulement gravitaire de l'eau vers le point bas de la mine. Pour maintenir les chantiers à sec pendant l'exploitation, l'eau des mines doit être pompée et rejetée en surface (l'exhaure). La quantité d'eau extraite d'une mine peut être considérable ; ainsi les mines de fer en Lorraine ont produit en moyenne 100 millions de m³ d'eau par an, soit autant de tonnes d'eau que de minerai de fer au maximum de l'extraction. Le cône de rabattement créé par l'exhaure du bassin houiller lorrain dans la nappe des grès du Trias inférieur est de l'ordre de 100 mètres *(figure 2)*, faisant quasiment disparaître la nappe au droit de Forbach et Merlebach [Vaute (2003)].

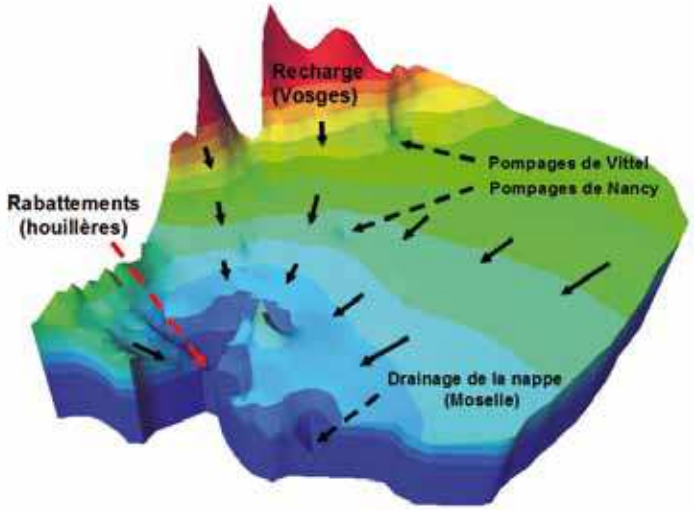


Fig. 2 : Cône de rabattement dans l'aquifère des grès du Trias inférieur dû à l'exhaure pour l'exploitation du charbon dans le bassin houiller lorrain (Vaute, 2003).

Fig. 2: The drawdown cone in the Lower Triassic sandstone aquifer due to dewatering when coal was being mined in the Lorraine basin (Vaute, 2003).

L'arrêt de l'exploitation des mines conduit généralement à l'arrêt de l'exhaure et à un ennoyage des vides miniers sous l'effet de la remontée des eaux. Il se constitue alors un réservoir d'eau qui se déverse le plus souvent en surface par une galerie de débordement *(photo 2)*. La remontée du niveau d'eau dans la mine abandonnée va permettre une reconstitution partielle des nappes sus-jacentes et la réactivation de sources asséchées par l'exhaure. Elle peut aussi conduire à l'inondation de zones basses ou de zones affaissées à la suite des travaux miniers.

Photo 2 : Débordement du bassin nord à la galerie de la Paix (bassin ferrifère lorrain) ; le débit annuel moyen est de l'ordre de 1 m³/s.

Photo 2: Overflow from the northern basin at the Gallery de la Paix (Lorraine iron-bearing basin); the annual flow rate is approximately 1 m³/s.

© R. Fabriol.

Connexion hydraulique entre aquifères

Quotidiennement, des forages profonds sont réalisés pour l'exploitation du pétrole, du gaz et de la géothermie, pour stocker du méthane ou, dans le futur, pour séquestrer du CO_2. Pour atteindre leurs cibles, qui peuvent se localiser à plusieurs kilomètres de profondeur, les forages traversent différents horizons géologiques dont certains sont aquifères. Les fluides remontés par le forage peuvent être agressifs et corroder le tubage ou le ciment jusqu'à leur percement. Ainsi, les fluides géothermaux profonds, chauds et salés, sont très corrosifs vis-à-vis des tubages classiques en acier *(photo 3)*.

Une fois percé, le forage joue le rôle de drain et, en fonction des charges hydrauliques des aquifères mis en communication, ceux-ci peuvent être drainés ou envahis par le fluide circulant. Même en l'absence de percement du tubage, une perte d'étanchéité de la cimentation à l'extrados peut mettre en relation deux aquifères superposés. Ce mécanisme conduit immanquablement à des situations critiques associant des instabilités mécaniques et des pollutions si l'eau d'un aquifère est mise en contact avec une roche soluble comme le sel ou le gypse. Les techniques modernes de forages permettent d'assurer la protection des aquifères par une cimentation soigneuse contrôlée par des méthodes géophysiques (diagraphies) et par l'utilisation de tubages insensibles à la corrosion.

Photo 3 : Tubage en acier (type K55) du forage géothermique de production de Villeneuve-la-Garenne, percé par corrosion. Ce tubage n'assure plus l'étanchéité vis-à-vis des aquifères traversés et peut conduire à une pollution de ceux-ci par le fluide géothermal.

Photo 3: Steel piping (K55 type) in the geothermal production borehole at Villeneuve-la-Garenne, breached due to corrosion. These pipes no longer ensure leak-tightness with respect to the aquifers through which they pass and are liable to cause these to be polluted by the geothermal fluid.

© BRGM / CFG.

Impact sur la qualité de l'eau

Le drainage minier acide (DMA)

La mise en contact de la roche initialement saturée en eau souterraine dans des conditions réductrices, avec l'oxygène de l'air qui circulent dans les galeries provoque des réactions d'oxydation. Le phénomène

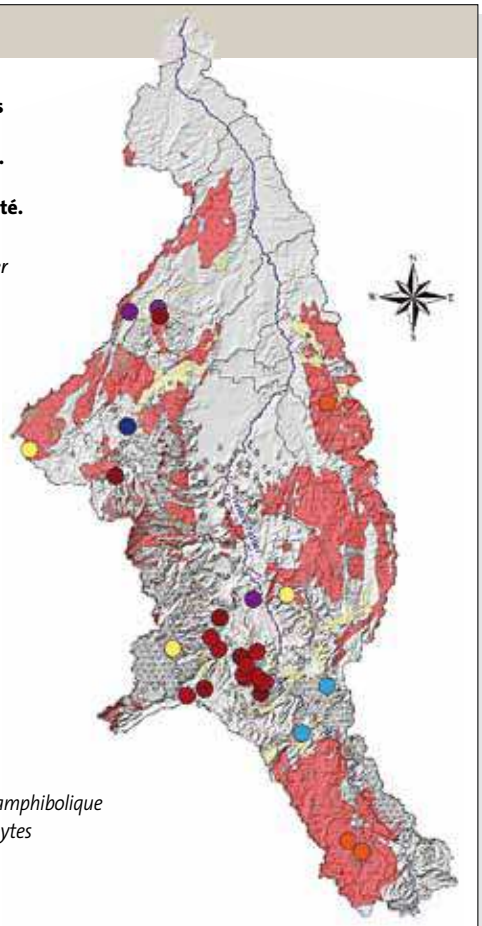
► L'Allier, rivière mémoire du minier

Sétareh Rad – Service Géologie, Unité Régolithe et Réservoirs – s.rad@brgm.fr

L'eau des précipitations peut soit s'infiltrer et circuler sous la forme d'eau souterraine, soit ruisseler en surface sous la forme de rivière. Au sein des massifs rocheux, ces cours d'eau s'imprègnent de la composition chimique de leur encaissant. Ainsi, au travers des analyses chimiques des phases dissoutes et des sédiments des rivières, on est à même de comprendre, quantifier et identifier l'origine des éléments chimiques présents dans l'environnement, à l'instar des compositions chimiques des métaux issus d'anciens sites d'exploitation minière.

L'Allier, principal affluent de la Loire, parcourt une grande partie du Massif central, qui fut la plus importante région minière de France pour les métaux de base. Le cours de l'Allier traverse ainsi d'anciens sites d'exploitation remontant parfois de l'époque romaine. Les analyses en éléments majeurs, traces ou isotopiques effectuées dans la rivière, nous révèlent l'histoire géologique des surfaces interagissant avec l'eau. Il a ainsi été démontré que le transfert des polluants métalliques issus de ces anciens sites d'exploitation demeure ponctuel au regard de la taille du bassin et du cours de la rivière qui s'étend sur plus de 400 km.

Les analyses isotopiques du lithium montrent qu'une partie de ces métaux provient de l'activité hydrothermale du Massif central. Les compositions géochimiques permettent ainsi d'avoir une approche intégrée qui s'appuie sur des points d'analyses dans le cours principal de l'Allier. Elle permet une compréhension du système, non seulement actuel, mais également sur des temps historiques (plusieurs siècles) ou géologiques (plusieurs millions d'années).



Localisation d'anciennes provinces minières dans le bassin de l'Allier. L'antimoine représente le minerai le plus exploité.

Locations of historical mining zones in the Allier basin. Antimony was the most intensively extracted ore.

Source : S. Rad, Projet TRANSPOSA.

Photo 4 : Écoulement d'eau en paroi d'une galerie de la mine de fluorine du Burg (Tarn) ; la couleur verte est due à l'altération d'une veine de chalcopyrite voisine (sulfure de fer et de cuivre).

Photo 4: Water seeping through the wall of a gallery in the Burg fluorite mine (Tarn Department); the green colour is due to the weathering of an adjacent vein of chalcopyrite (iron and copper sulphide).

© J.-M. Schmitt.

le plus répandu est l'oxydation des sulfures contenus dans la roche et dont l'un des produits est l'acide sulfurique. L'acidité ainsi engendrée favorise la dissolution des autres minéraux constitutifs de la roche et libère les constituants chimiques dont certains, comme les métaux lourds (plomb, zinc, arsenic, chrome, etc.), sont toxiques. Cette chaîne de réactions est souvent catalysée par des bactéries. Le sulfure concerné est généralement la pyrite (sulfure de fer), présente en abondance dans les roches. Dans le domaine minier, ce mécanisme chimique est appelé drainage minier acide (DMA) [Schmitt *et al.*, (2004)]. C'est lui qui est à l'origine des effluents miniers acides aux couleurs souvent spectaculaires liées aux métaux en solution *(photo 4)*. L'impact des effluents issus du DMA est dévastateur pour la faune et la flore ; seules des bactéries et certaines algues se développent dans un tel milieu.

Dans certains contextes géologiques où les roches carbonatées (calcaires et dolomies) sont abondantes, l'acidité peut être neutralisée naturellement par attaque des carbonates. Il en résulte une eau à pH neutre, riche en sulfates et dans certains cas en éléments métalliques. Ce mécanisme est appelé drainage minier neutre (DMN) ; il est présent dans le bassin ferrifère lorrain où l'eau des réservoirs des mines ennoyées est à pH 7 avec une concentration élevée en sulfate de calcium pouvant dépasser 1 g/L [Collon *et al.*, (2004)].

Les pollutions salines

En contexte salifère, le risque de pollution de l'eau souterraine par des travaux miniers est particulièrement accentué sous l'effet de la saumure qui peut atteindre la saturation (320 g/L) au sein de cavités ennoyées. Si les cavités sont stables mécaniquement, la circulation de la saumure est ralentie, voire inhibée, par l'effet gravitaire qui a tendance à maintenir l'eau salée dense en profondeur. L'émission de saumure est lente et essentiellement due à la diminution de volume des cavités provoquée par le fluage du sel. Si les cavités sont instables et évoluent jusqu'à l'effondrement, l'expulsion de saumure dans le système aquifère environnant est inévitable. Cette situation est observée dans le gisement de sel lorrain exploité dans la région de Dombasle-sur-Meurthe *(figure 3)*.

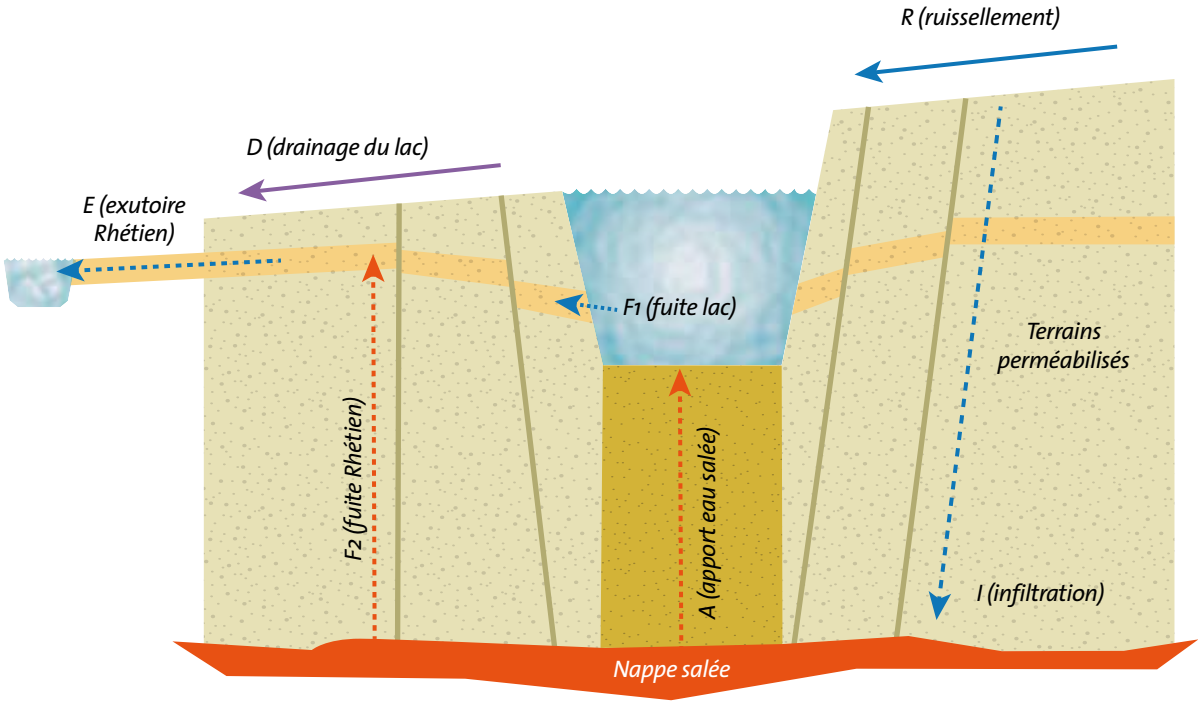


Fig. 3 : Schéma conceptuel des processus de salinisation d'un aquifère au sein de la couverture d'un gisement salifère exploité par cavité lixiviée effondrée – exemple de la Lorraine dans la région de Dombasle-sur-Meurthe. L'exploitation du sel par injection d'eau douce conduit à terme, selon la méthode employée, à la formation d'une cavité qui s'effondre lorsqu'elle atteint la taille critique. L'effondrement affecte la surface du sol et produit un cratère qui est généralement occupé par un lac dont l'eau est salée en profondeur sous l'effet de l'expulsion de la saumure au moment de l'effondrement. Le lac salé peut alors contaminer les formations aquifères avec lesquelles il est en contact hydraulique, tel que l'aquifère des grès rhétiens dans le cas de la Lorraine.

Fig. 3: A diagram depicting salinisation processes in an aquifer in the cover of a salt-bearing deposit worked by cavity leached until collapse – example from the Dombasle-sur-Meurthe area in the Lorraine region. Extracting salt by injecting fresh water eventually results in forming a cavity which, according to the method used, collapses once it reaches a critical size; the collapse affects the ground surface, producing a crater generally occupied by a lake containing saline water at depth due to the expulsion of brine when the collapse occurs. The salt lake may subsequently contaminate the aquifer formations with which it is in hydraulic contact, like the Rhaetian sandstone aquifer in the case of the Lorraine region.

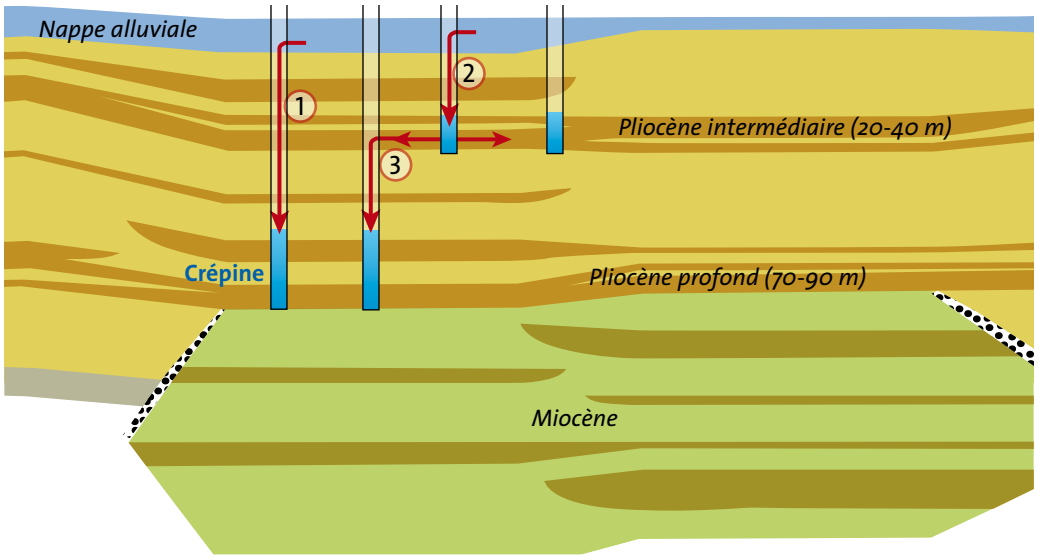


Fig. 4 : Schéma des transferts de pollutions entre aquifères du Roussillon à cause de forages défectueux anciens ou mal isolés (Ladouche *et al.*, 2003).

Fig. 4: A diagram of pollution transfers between aquifers in the Roussillon Department caused by old defective boreholes or by ones that are improperly sealed (Ladouche et al.*, 2003).*

Pollution des aquifères par les forages

Chaque forage est une intrusion dans les aquifères traversés, et il peut devenir un vecteur de pollution si l'étanchéité du tubage et de la cimentation n'est pas assurée. Le cas de pollution de forages AEP (alimentation en eau potable) par une contamination provenant de la surface, et dont la cause est un mauvais état du forage, n'est pas rare. Les dénombrer n'est pas aisé car, dès qu'ils sont considérés comme trop pollués pour une utilisation pour l'AEP, ils ne sont plus suivis ni comptabilisés. Les grands aquifères comme celui du Roussillon peuvent compter plusieurs centaines de forages d'exploitation dont les plus anciens, souvent dégradés, permettent le transfert de nitrates d'origine agricole vers les niveaux les plus profonds *(figure 4)*.

Les travaux souterrains au cours de leur période d'exploitation comme après leur abandon sont la cause d'impacts qui peuvent être importants sur le régime des eaux souterraines et superficielles aussi bien sur le plan de la quantité que de la qualité. Ces phénomènes sont inéluctables et l'on doit chercher à les minimiser par des études hydrogéologiques, géomécaniques et géochimiques approfondies dès la phase de conception des ouvrages. Dans certains cas, des impacts préjudiciables ne pourront pas être complètement évités et des mesures compensatoires, appuyées par des dispositifs de surveillance, devront être mises en œuvre.

> *Chaque forage est une intrusion et peut devenir un vecteur de pollution si l'étanchéité du tubage et de la cimentation n'est pas assurée.*

Underground works: hydrodynamic disturbances and pollution risks

Underground works (tunnels, mines, underground storage facilities, and the tapping of geothermal or hydrocarbon reservoirs) create discontinuities in the subsurface which act as drains for water. Their impacts are both hydrodynamic and chemical. Amongst the hydrodynamic impacts, lowered levels of aquifers are the most visible. They are observed when the galleries of large tunnels or underground mines are excavated. Although less obvious, the hydraulic connection that may form via defective boreholes has considerable effect on groundwater use. Moreover, underground works promote chemical reactions between water, rock and the oxygen in the air. This leads to deteriorated water quality, in some cases involving the solution of toxic elements like heavy metals. Acid mine drainage (AMD) is a classic example of this type of reaction, which may at times have a dramatic impact on flora and fauna. Boreholes, much more numerous than large-scale underground works, can cause chemical or bacteriological pollutions passing from one aquifer to another when they are interconnected where piping or cementation is not leak-tight. When the rocks penetrated are soluble, like salt or gypsum, improperly sealed boreholes are liable to give rise to strong interactions with groundwater. Underground works, once abandoned, can significantly impact the regime of both groundwater and surface waters, both quantitatively and qualitatively. While such phenomena are unavoidable, every effort must be made to hold these to a minimum by undertaking detailed hydrogeological and geochemical studies when the structures are still in the design phase.

Bibliographie : **Collon P., Fabriol R., Buès M. (2004)** – Ennoyage des mines de fer lorraines : impact sur la qualité de l'eau. C.R. Geoscience 336 (2004) p 889-899. **Giafferi J.-L., Defargues D., Piedevache M., Cachau P., Lettry Y., (2008)** – Reconnaissances à l'avancement dans la la galerie hydraulique Salazie-Amont (île de la Réunion). AFTES, Tunnels et ouvrages souterrains. N° 209. **Ladouche B., Duvail C., Marchal J.-P., Le Strat P. (2003)** – Détermination de l'origine des nitrates dans l'aquifère du Roussillon par traçage isotopique des sources d'azote (commune de Pia, Pyrénées-Orientales). Rapport BRGM/RP-52745-FR 54 p. **Maréchal J.-C. (2000)** – Massif du Mont-Blanc : identification d'une structure hydrogéologique majeure. La Houille Blanche 6 (2000) p 78-86. **Schmitt J.-M., Ledoux E., Combes P., (2004)** – Qualité des eaux après fermeture des mines : remplissage initial, évolution transitoire, stabilisation à long terme et gestion environnementale, Revue Française de Géotechnique, N° 106-107, 1er et 2e trimestres 2004, p.95-101. **Vaute L. (2003)** – Révision du modèle hydrogéologique de gestion de la nappe des grès du Trias inférieur en Lorraine. Rapport final. BRGM/RP-51355-FR, 59 p.