

La formation des gisements d'eau minérale

La notion de gisement d'eau minérale implique une structure géologique traversée par un flux d'eau météorique qui y acquiert sa minéralisation. Une fonction de transfert alimentation - écoulement, commandée par les moteurs et les paramètres de cette circulation profonde, caractérise chaque système.

La connaissance de cette fonction, étudiée tant sous son aspect quantitatif que qualitatif, est indispensable pour la gestion et la protection de l'eau.

par **Bernard Blavoux**,
Professeur à l'Université d'Avignon

On sait de nos jours, grâce notamment aux techniques isotopiques [1], que l'eau minérale naturelle est une eau de pluie infiltrée en profondeur qui acquiert ses caractéristiques physico-chimiques au cours d'écoulements très lents, puis rejoint rapidement la surface à la faveur d'accidents géologiques ou de structures très particulières.

A la notion de gisement familière à l'Ingénieur des mines qui considère une accumulation naturelle, locale, d'eau minérale susceptible d'être exploitée, l'hydrogéologue préfère la notion de système hydrominéral qui implique une structure géologique traversée par un flux d'eau qui y acquiert sa minéralisation. Il s'agit, en effet, d'une ressource renouvelable et durable à l'échelle humaine si on respecte les équilibres entrée-sortie. A l'échelle géologique, toutefois, cette ressource n'est que transitoire parce qu'elle est soumise à la pérennité de la structure et à la constance des conditions physico-chimiques en profondeur et des conditions climatiques en surface.

Le choix a été fait de présenter ci-après les paramètres et les mécanismes de la circulation de l'eau minérale sous la forme d'un schéma-type de fonctionnement, qui puisse être transposé à toutes les situations. L'entreprise est difficile, compte tenu de la très grande diversité des gisements de notre territoire dont la

richesse géologique permet l'émergence d'eaux très différentes par la nature et la concentration des sels dissous ainsi que par leur température [2]. Cette diversité n'est d'ailleurs pas limitée par un concept quantitatif de minéralisation puisque, selon la législation française, une eau minérale naturelle se différencie des autres eaux par une composition constante et des propriétés favorables à la santé et que ce concept permet la reconnaissance d'eaux très faiblement minéralisées.

Le schéma du circuit hydrominéral

Le schéma du circuit hydrominéral présente la structure suivante :

- une aire d'alimentation avec infiltration d'eau météorique ;
- un réseau d'infiltration, ou colonne d'infiltration, vaste en volume mais à vitesses d'écoulement très lentes dans lequel l'eau se minéralise ;

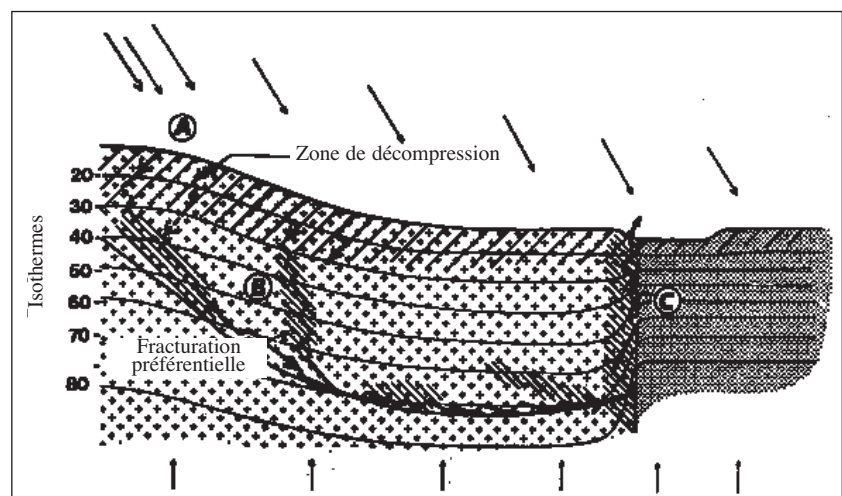


Fig.1. - Schéma du circuit de l'eau thermominérale. A : aire d'alimentation, B : colonne d'infiltration, C : axe vertical de collecte.

- un axe vertical de collecte agissant en drain et permettant l'arrivée rapide en surface de l'eau minérale ; au cours de cette remontée, l'eau minérale conserve, pour l'essentiel, la température et la composition chimique acquises en profondeur ; sa pression diminue, en restant supérieure néanmoins à celles des aquifères qu'elle traverse à faible profondeur (sources artésiennes).

Le modèle de la figure 1 représente un système hydrothermal de socle cristallin en bordure d'un fossé d'effondrement rempli de terrains sédimentaires, du type de ceux rencontrés dans le Massif central français : (Chatelguyon, Vichy, St-Galmier - Badoit...). Les eaux de pluie tombant sur les massifs cristallins s'infiltrent à grande profondeur bien en-deçà de la zone de décompression superficielle, grâce à la fracturation préférentielle acquise par le massif au cours de son histoire géologique. L'émergence naturelle de cette eau profonde est due à l'existence d'un court-circuit hydraulique à forte transmissivité, constitué par le réseau des grandes failles d'effondrement du fossé. La remontée de l'eau minérale par les drains et sa permanence dans le temps nécessitent une différence de charge hydraulique entre zone d'alimentation et zone d'émergence dont l'effet est augmenté, dans ce cas, par une baisse de densité de l'eau provoquée par un dégagement abondant de CO₂ d'origine mantellique drainé à la faveur des failles d'effondrement et par

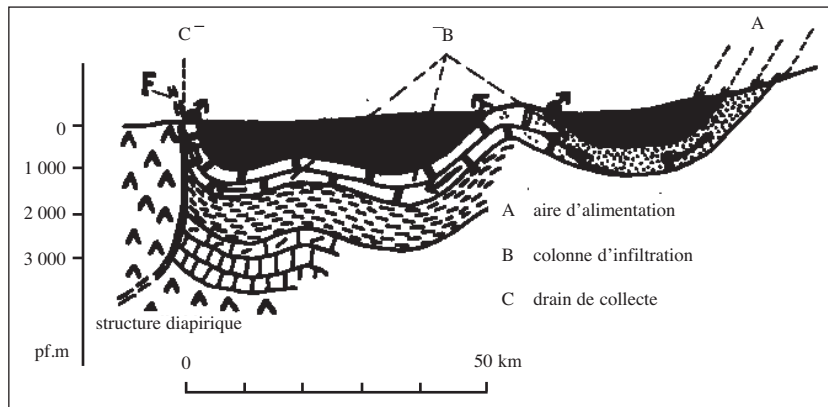


Fig. 2. - Coupe semi-schématique de la région du Bas-Adour. Le circuit de l'eau thermique et minérale de Dax.

une élévation importante de la température.

Ce schéma peut être transposé à d'autres situations et deux seront évoquées.

La première concerne la région du Bas-Adour (voir la figure 2) qui est caractérisée par une structure géologique complexe liée à la poussée du front pyrénéen qui a favorisé des montées diapiriques, comme celle de Dax. Ces montées ont plissé et redressé les calcaires et dolomies du Crétacé supérieur qui contiennent une nappe profonde, étendue, d'importance régionale. A la faveur de ces structures, il s'établit des circulations ascendantes qui se manifestent par les sources thermales dont certaines sont captées depuis l'époque gallo-romaine.

La seconde concerne les terrains quaternaires, glaciaires et fluvioglaciaires de la

rive sud du lac Léman (voir la figure 3), qui renferment un aquifère minéral, celui d'Evian. Les eaux minérales percent la couverture morainique imperméable d'argile à blocs à la terminaison d'un delta ancien constitué de sables grossiers. Pour l'obtention du profil minéral deux conditions sont nécessaires : un réservoir captif entre deux moraines et composé de sables polygéniques, et un temps de séjour de l'eau estimé à 50 ans. Le passage latéral des faciès de sables aux argiles à la terminaison du paléodelta constitue dans ce cas un barrage à l'écoulement, mais un axe drainant a réussi à s'établir par lessivage de fissures dans la couverture argileuse là où elle est la moins épaisse.

Les moteurs et les paramètres de la circulation

La circulation de l'eau minérale et sa remontée dans le drain terminal impliquent nécessairement une différence de charge hydraulique entre zone d'alimentation et zone d'émergence. C'est ainsi qu'en région de montagne, la très grande différence d'altitude entre les hauts reliefs, zone d'alimentation et les grandes vallées glaciaires, point d'aboutissement du circuit hydrominéral, engendre de très forts gradients hydrauliques, capables de pousser des eaux météoriques jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur.

L'effet de cette différence de charge est augmenté, le cas échéant, par l'élévation importante de température dans la partie profonde et terminale du circuit, élévation qui provoque une baisse de

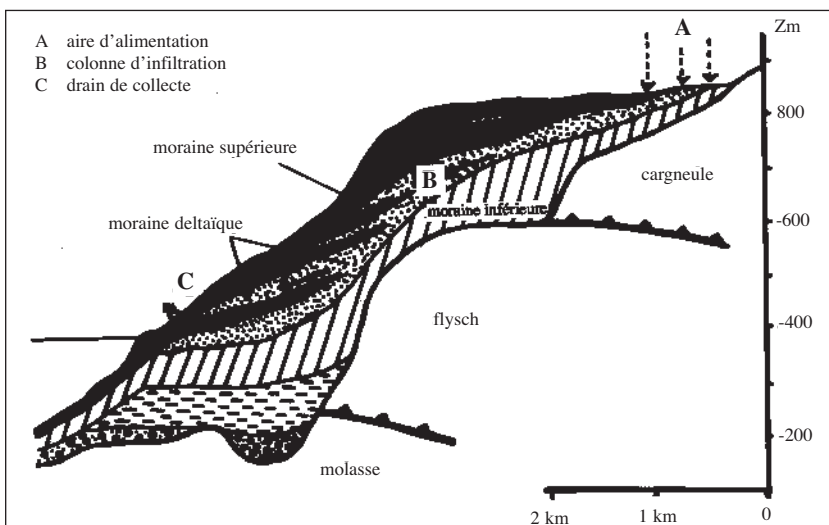


Fig. 3. - Coupe semi-schématique du versant sud du lac Léman. Le circuit de l'eau minérale d'Evian.

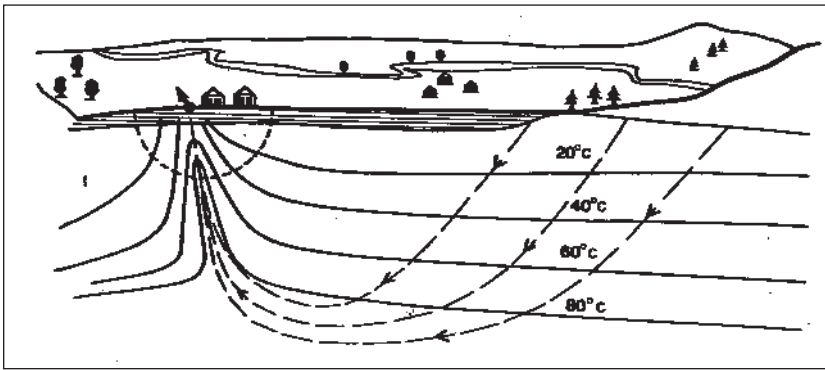


Fig. 4. - Refroidissement au cours de la remontée.

densité de l'eau et, accessoirement, une baisse de la viscosité. Dans d'autres cas, le dégagement important de gaz carbonique d'origine magmatique, provoqué par la baisse de pression de l'eau lors de sa remontée, peut entretenir ou accroître l'artésianisme.

La proportion d'eau contenue dans le réseau d'infiltration exprimée par la porosité dépend de la nature, de la texture et de l'état de fracturation et de dissolution des unités géologiques constituant le réservoir. D'une manière générale, toutes unités confondues, la porosité décroît de manière très significative de la surface vers la profondeur. La perméabilité, qui est l'aptitude à l'écoulement de l'eau, dépend de la connexion des vides. On constate également une décroissance verticale des perméabilités et on distingue la zone de décompression superficielle (les 50 à 200 premiers mètres) et de roches non consolidées comme les alluvions et sédiments récents à très forte perméabilité, des zones profondes à très faible perméabilité et dont les valeurs et la nature dépendent des roches considérées.

Les exemples évoqués ci-avant présentent, dans le cas général, un réservoir à porosité et perméabilité de fissures comme peut l'être un massif granitique au sein d'un ensemble de roches métamorphiques de gneiss et schistes cristallins ; dans le cas du Bas-Adour, un réservoir de calcaire dolomitique à perméabilité de fissures et de fractures induites par l'organisation lithologique et structurale ainsi que, vraisemblablement, par dissolution ; enfin, dans le cas d'Evian, un réservoir poreux de sédiments détritiques, silts, sables et graviers deltaïques au sein desquels s'organise un réseau de sillons graveleux.

Les conditions d'émergence

Les conditions créant l'émergence des eaux minérales sont d'abord structurales. L'arrivée en surface d'eau profonde dont la composition chimique ou la température impliquent une circulation en-deçà de la zone de décompression superficielle, nécessite, en effet, l'existence d'un conduit ascendant à forte perméabilité. Ce court-circuit hydraulique doit rester ouvert et résulte généralement d'une fracturation créée ou réactivée par une tectonique active récente. Pour confirmation, on observera que la quasi-totalité des sources minérales françaises se situe au sud-est d'une ligne Bordeaux-Sedan dans les régions affectées par les orogènes pyrénéenne et alpine et, donc, par une tectonique récente, voire actuelle [2]. Plusieurs observations dans les Alpes

occidentales ont montré qu'il existe une relation entre sismicité et phénomènes hydrothermaux. Pour le Massif central qui a subi le contrecoup de la tectonique alpine, les mouvements d'extension qui ont permis la manifestation d'un volcanisme tertiaire et quaternaire sont propices à la remontée des eaux minérales profondes carbogazeuses le long des grands accidents méridiens des fossés oligocènes. La relaxation engendrée par la surrection des massifs montagneux sous l'effet conjugué d'une tectonique encore active et de l'allègement consécutif à la fonte des grands glaciers quaternaires est également favorable au maintien en ouverture de la fracturation. Il est, enfin, des cas particuliers où l'eau minérale est contrainte à l'émergence parce qu'elle rencontre un terrain imperméable où elle ne peut plus progresser.

Au cours de la remontée, l'eau minérale traverse des terrains de plus en plus froids et elle perd des calories (voir la figure 4), des milieux à perméabilité de plus en plus forte et le conduit minéral principal tend à se ramifier en plusieurs branches, que le milieu soit fissuré ou poreux (voir la figure 5).

L'eau minérale profonde peut difficilement se frayer une voie jusqu'en surface sans être affectée par un mélange avec des eaux superficielles. Ainsi, on observe généralement dans la zone d'émergence plusieurs sources correspondant à des mélanges en proportions

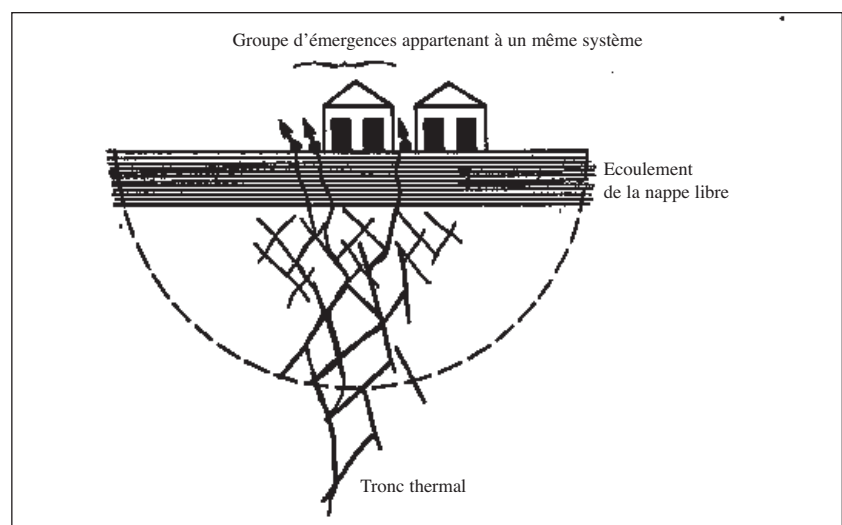


Fig. 5. - Diffusion du tronc thermal près de la surface.

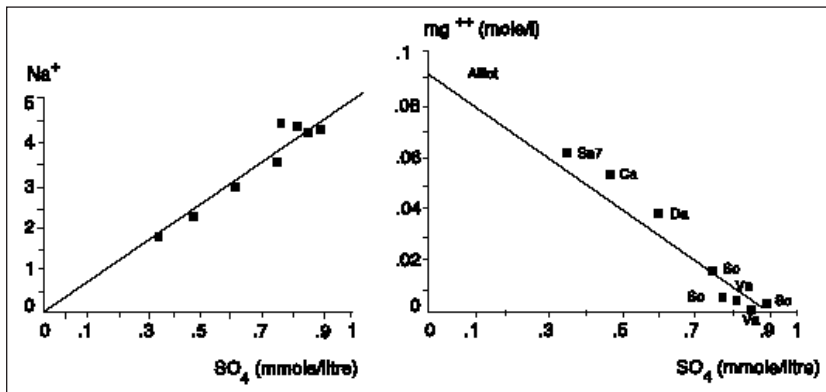


Fig. 6. - Composition chimique en fonction du sulfate mettant en évidence les mélanges : exemple de Plombières-les-Bains.

différentes, mais appartenant toutefois à la même *lignée géochimique*. Suivant le contexte hydrogéologique, on distingue la source principale (ou les sources principales), peu sujette aux fluctuations hydrodynamiques et caractérisée par un maximum de concentration chimique et ou de température, et les sources secondaires, sujettes à fluctuations sensibles et affectées d'un mélange plus important avec des eaux de surface ou les nappes dites « libres » [3].

Pour étudier ces mélanges généralement binaires, il est usuel d'examiner les corrélations entre éléments de tous les points d'eau de la zone d'émergence. On reporte sur un diagramme les différentes espèces chimiques, magnésium, calcium, sulfures, etc. en fonction de l'élément le plus représentatif des eaux profondes. Cet élément représentatif doit être conservatif et est généralement choisi parmi les chlorures, le sodium, ou les sulfates si les eaux ne sont pas sulfurées. Dans l'exemple des eaux thermales de Plombières (voir la figure 6), des corrélations positives entre teneurs en sodium et sulfates, négatives entre teneurs en magnésium et sulfates, confirment la thèse d'un mélange de l'eau minérale avec une eau superficielle pauvre en sodium et riche en magnésium [4].

La fonction de transfert

La ressource étant renouvelable, on doit considérer le système hydrominéral comme une séquence du cycle de l'eau présentant des interactions hydrodynamique, hydrochimique et hydrobiologique avec son environnement. Le

système peut être caractérisé par une fonction de transfert, impulsion (alimentation) - réponse (écoulement), dont la connaissance est indispensable pour bien gérer et protéger la ressource. Cette fonction de transfert doit être considérée sous ses aspects à la fois quantitatif, avec la transmission rapide des différences de charge ou de pression, et qualitatif, avec le déplacement de l'eau et des substances à des vitesses d'écoulement généralement très lentes. L'influence des différences de pression peut se manifester à l'entrée du système par des variations de l'alimentation (sécheresse prolongée, années très pluvieuses). Un surplus d'eau sur la zone d'alimentation exerce une pression sur le circuit hydrominéral et entraîne une augmentation de débit à l'émergence. Inversement, un déficit chronique d'apport entraîne une baisse du débit, au temps de transfert près de l'onde de pression. Ceci a pu être vérifié à Luchon [5] sur un circuit thermominéral sulfuré sodique en milieu granitique, grâce à l'analyse de dix années de mesures du débit des sources et à la corrélation avérée des fluctuations de débit avec les pluies de cette période.

L'influence des différences de pression se manifeste aussi, et surtout, sur les sorties du système hydrominéral. L'influence de la pression atmosphérique est importante sur un aquifère captif et les niveaux piézométriques varient rapidement en fonction inverse de celle-ci. La compressibilité du ter-

rain et la plus ou moins bonne étanchéité du toit imperméable de la nappe peuvent toutefois atténuer l'effet produit qui, au passage d'une dépression, peut se traduire par une élévation de 30 cm du niveau piézométrique. Du fait qu'il s'établit souvent dans la zone d'émergence un équilibre hydrostatique entre les eaux superficielles et les eaux minérales profondes, la rupture de cet équilibre peut avoir des conséquences graves sur le débit et la qualité de ces dernières. C'est ainsi qu'une surcharge hydraulique d'eau douce a été utilisée naguère pour de nombreux captages en sites alluviaux [6], afin d'imposer à l'eau minérale de sourdre au point déterminé dans une colonne de moindre résistance. Les variations de pression dans le cas des eaux carbonatées sont particulièrement complexes et peuvent relever, en dehors des causes déjà évoquées, de phénomènes cycliques de dégagements de CO₂ magmatiques, liés aux marées terrestres ou même à des courants de convection. Les vitesses d'écoulement de l'eau sont très lentes, particulièrement dans le réseau d'infiltration. Il est évident que la vulnérabilité éloignée du système hydrominéral, celle de la zone d'alimentation, dépend du temps de transit de l'eau minérale. Mais l'âge de l'eau minérale est un des paramètres les plus

La quasi-totalité des sources minérales françaises se situe au sud-est d'une ligne Bordeaux-Sedan, dans les régions affectées par les orogénèses pyrénéenne et alpine et, donc, par une tectonique récente, voire actuelle

déliés à appréhender, d'une part parce qu'il est difficile de caractériser la composante profonde minéralisée à cause des mélanges dans la

zone d'émergence, d'autre part parce que les temps de transit très élevés nécessitent la mise en œuvre de techniques de datation élaborées et, pour certaines, encore à l'état de mise au point [7]. La technique de datation par le radiocarbone (¹⁴C) butte à la fois sur des problèmes d'interprétation avec le choix d'un modèle pour le calcul de l'activité initiale en carbone moderne et sur la présence fréquente dans l'eau minérale de CO₂ magmatique avec un carbone 14 mort. Quelques datations ont été obtenues sur les eaux sulfurées sodiques [2] dans les Pyrénées, à Cauterets (5 100 ans sur le groupe

nord) et à Luchon (14 000 ans), et en Corse, à Guagno-les-Bains (6 000 ans). Elles confirment les vitesses d'écoulement extrêmement faibles des eaux dans la profondeur des massifs de granite.

Les principes de la protection

Les risques liés à l'aire d'alimentation relèvent de la protection éloignée.

Cette protection est d'abord quantitative pour tous les systèmes et n'est qualitative que pour les circuits généralement froids dont le temps de transit est rapide. Elle nécessite, évidemment, de situer l'aire d'alimentation et de connaître la fonction de transfert.

La protection quantitative consiste à veiller à ce que des transformations irréversibles ne portent atteinte au volume d'eau infiltrée. Parmi les atteintes possibles, on citera l'urbanisation privi-
légiant le ruissellement, pour les mêmes raisons, la déforestation, les aménagements hydrauliques comme le drainage agricole ou les barrages entraînant des transferts d'eau hors de la zone d'infiltration. Le transit des

eaux minérales s'effectuant généralement en grande profondeur, les risques de détournement ou de dérivation existent avec la réalisation

de grands travaux souterrains comme, par exemple, les exploitations minières, les forages géothermiques ou les tunnels sous les massifs montagneux.

La protection qualitative concerne aussi la zone d'alimentation quand le temps de transit de l'eau est court. Bien qu'il y ait dilution importante, eu égard au volume des précipitations par rapport à celui du réservoir, les éléments chimiques conservatifs, majeurs ou traces toxiques peuvent atteindre l'exutoire en

cas de pollution chronique de l'aire d'alimentation résultant de l'occupation par l'homme comme, par exemple, l'agriculture intensive avec ses engrais et pesticides, les usines et les grandes voies de communication. Dans le but de prévenir ces risques, les grandes marques françaises d'eau minérale en bouteilles ont mis en place différents programmes de gestion de l'impluvium de leurs sources.

Le captage et son environnement immédiat constituent l'espace le plus fragile et nécessitent une protection sanitaire rapprochée. L'ouvrage de captage doit présenter une étanchéité parfaite aux infiltrations des nappes superficielles. Les risques de pollution dans la zone urbanisée qu'est devenue presque toujours l'aire d'émergence sont essentiellement liés aux réseaux d'égouts et d'eaux pluviales, au réseau hydrographique, aux citernes de mazout, à l'exécution d'ouvrages de fouilles et de fondations, à l'emploi d'engrais ou pesticides sur les espaces verts. De fait, la protection rapprochée est d'abord qualitative. Même si le captage est étanche, il coiffe souvent les émergences naturelles, parmi lesquelles se trouvent des sources affectées d'un mélange avec les eaux superficielles en

Les risques de pollution de l'aire d'émergence sont essentiellement liés aux réseaux d'égouts et d'eaux pluviales, au réseau hydrographique, aux citernes de mazout, aux fouilles ou fondations, à l'emploi d'engrais ou pesticides

amont du captage, dans la zone de décompression. Elles sont donc aussi potentiellement vulnérables à la pollution. Pour isoler la venue minérale de son environnement hydrogéologique vulnérable et garantir une bonne protection sanitaire, une méthode de captage prévaut aujourd'hui qui consiste à réaliser un forage dont la cible est le conduit minéral avant ses divergences et mélanges à une profondeur généralement comprise entre 50 et 100 mètres.

Le recours au forage nécessite de bien connaître le fonctionnement détaillé du système hydrominéral et, en particulier,

les mécanismes d'acquisition de la minéralisation de l'eau. Cette solution demande de s'en rapporter à la notion de gisement thermal, de réfléchir à la signification de la référence de composition, de prendre en compte les variations dans le temps des caractéristiques de débit et de composition, par des contrôles permanents permettant d'interpréter l'action des phénomènes naturels.

Si le recours au forage permet généralement une augmentation de productivité par rapport à la source et autorise plus de souplesse d'exploitation grâce au pompage, l'équilibre qui existait entre les entrées et les sorties du système, tant qu'il fonctionnait avec des exutoires naturels, ne doit pas être rompu par des prélèvements excessifs. Cet équilibre n'est pas constaté, au premier degré, entre les émergences qui représentent l'ensemble de la production et les sorties occultes d'une part, la fonction d'entrée, en général très mal connue puisque diffuse, d'autre part. Une surveillance hydrodynamique renforcée doit en conséquence être mise en place par le gestionnaire. ●

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. Blavoux : Apports des techniques isotopiques à la connaissance des gisements d'eau minérale, *La Houille Blanche* n° 2/3-1995, p. 51-58.
- [2] Terroirs et thermalisme de France. Sous la direction de C. Pomerol et J. Ricour, Editions du BRGM (1992).
- [3] B. Blavoux et F. Berthier : Les originalités hydrogéologique et technologique des eaux minérales, *Bull. Soc. geol. France*, t.I, n° 7-1985, p. 1033-1044.
- [4] D. Garcia : Etude isotopique et géochimique des eaux thermales des Vosges méridionales, thèse de 3e cycle présentée à l'Université de Montpellier II, Document du B.R.G.M. n° 112 -1986.
- [5] J.-C. Soule : Conséquences des influences des conditions climatiques sur l'exploitation des sources thermales. Exemples : Eaux sulfurées de Luchon et de Cauterets, Actes du Colloque National sur la Qualité de l'Eau Thermale, La Villette 1991, édité par Thermalliance.
- [6] De Launay : Recherche, captage et aménagement des sources thermominérales, Paris - Baudry et Cie, 1899.
- [7] J.-C. Fontes : Some considerations on ground water dating using environmental isotopes, *Hydrogeology in the Service of Man, Memoires of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists*, Cambridge -1985.