

# Éléments conservatifs vers de nouveaux horizons

**Un nouveau modèle des échanges gazeux dans les eaux souterraines basé sur l'idée d'un équilibre entre l'eau et l'air emprisonné dans le sol donne une explication physique à la présence occasionnelle d'air en excès dans les eaux souterraines. Il permet ainsi une interprétation pertinente des concentrations gazeuses de l'atmosphère de même qu'une meilleure quantification de l'hélium radiogène, ce qui permet de dater les eaux souterraines jeunes avec une plus grande exactitude.**

Au cours des trois dernières décennies, des méthodes impliquant des traceurs ont été employées avec succès pour étudier la formation d'eau profonde dans les océans et les grands lacs [1, 2]. Ces méthodes sont basées sur la mesure de gaz conservatifs à l'état de trace comme p. ex. les gaz rares. Si l'on suit l'évolution dans le temps des concentrations de ces traceurs transitoires, on peut reconnaître des lois générales simples: l'eau s'enrichit en  $^3\text{He}$  (hélium) puisque le tritium ( $^3\text{H}$ ), isotope radioactif de l'hydrogène lié aux molécules d'eau, se désintègre en  $^3\text{He}$ . Les concentrations en traceurs transitoires dans l'eau donnent donc une indication sur le temps écoulé depuis que l'eau a entre tenu pour la dernière fois des échanges avec l'atmosphère (âge de l'eau).

Il était évidemment tentant d'essayer de transposer ces concepts efficace à l'étude des eaux souterraines et d'utiliser ce genre de traceurs pour déterminer leur temps de séjour dans les nappes ainsi que leur taux de renouvellement. Mais étant donné que les échanges gazeux entre l'air du sol et l'eau souterraine s'effectuent selon des mécanismes beaucoup plus complexes qu'entre l'eau libre et l'atmosphère, il n'était pas possible d'appliquer telles quelles les lois valables pour les océans. Notamment la présence d'air en excès dans les eaux souterraines rend la datation au  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$  particulièrement délicate. Pour parer à ces difficultés, le groupe «Isotopes de l'environnement» de l'EAWAG s'attache depuis plusieurs années à mieux comprendre les échanges gazeux entre l'atmosphère, le sol et les eaux souterraines.

## Air en excès dans les eaux souterraines

Étant donné que la solubilité des gaz rares dans l'eau dépend fortement de la température, leur concentration d'équilibre donne une indication directe sur la température à laquelle se sont effectués les échanges gazeux. Contrairement à l'eau libre, les eaux souterraines présentent des concentrations en gaz rares atmosphériques nettement supérieures à leurs concentrations d'équilibre (Fig. 1). Pour déterminer la température de l'échange, il faut donc distinguer que les concentrations mesurées sont composées des concentrations d'équilibre contenant les informations paléoclimatiques, ainsi que des composantes excédentaires. L'excédent fait partie d'une fraction appelée air en excès ou «excess air», qui a à peu près la composition de l'atmosphère. Bien que la présence d'air en excès dans les eaux souterraines soit connue depuis des décennies et qu'elle constitue un obstacle à l'utilisation des gaz rares atmosphériques pour la détermination de la température, on a très peu cherché à comprendre comment l'«excess air» se formait dans les eaux souterraines.

Dans l'eau, le néon (Ne), l'argon (Ar), le krypton (Kr) et le xénon (Xe) proviennent uniquement de l'atmosphère alors que l'hélium peut également avoir une origine non atmosphérique. Sans compter l'hélium, on dispose donc de quatre gaz rares atmosphériques dont les concentrations peuvent servir à la résolution d'un système d'équations pour caractériser les échanges gazeux dans l'eau souterraine (Fig. 1). Ceux-ci sont décrits par trois principaux paramètres arbi-

traires: la température, la quantité d'air en excès et son fractionnement (composition modifiée par rapport à l'atmosphère). La pression est souvent clairement définie par l'altitude de la zone d'infiltration; elle est donc connue. Ces équations peuvent être résolues de manière itérative à l'aide de méthodes statistiques appropriées et livrent

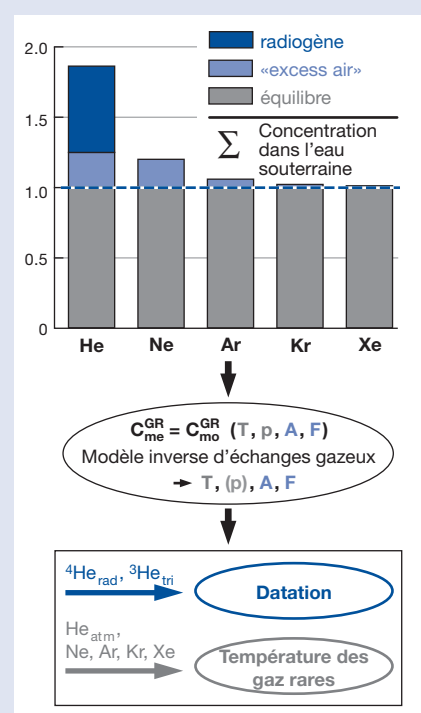


Fig. 1: Modèle explicatif de la sursaturation en gaz rares dans les eaux souterraines.

Les concentrations en gaz rares atmosphériques mesurées ( $\Sigma$ ) sont nettement plus élevées que leurs concentrations d'équilibre (en gris) qui sont déterminées en fonction de la pression (p), de la température moyenne (T) et de la solubilité spécifique des gaz. Plus un gaz rare est léger, plus sa concentration excédentaire est importante («excess air», A, en bleu clair). L'excédent relatif de gaz rares purement atmosphériques (Ne, Ar, Kr, Xe) est similaire à celui de l'atmosphère, mais enrichie en gaz lourds (F, fractionnement). He est le seul gaz rare à être de plus produit par désintégration d'autres atomes ( $^4\text{He}$ : désintégration de l'U et du Th,  $^3\text{He}$ : désintégration du  $^3\text{H}$ ). Dans le modèle, les paramètres T, A, F et p ainsi que les concentrations des 4 gaz rares atmosphériques Ne, Ar, Kr et Xe ( $C_{me}^{GR}$ , me = mesurée, mo = modélisée) interviennent. Des méthodes statistiques permettent dans ce modèle de calculer les composantes atmosphériques et radiogènes de la concentration en He, ce qui autorise une bonne datation des eaux souterraines.

des valeurs pour la température et les autres paramètres arbitraires [3]. Des modèles établis sur des bases physiques plus ou moins solides ont déjà été proposés pour décrire les concentrations en gaz rares atmosphériques des eaux souterraines. Dans la plupart des cas, ils n'expliquent cependant pas l'excédent d'hélium atmosphériques que l'on peut déduire des concentrations en  $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$  mesurées dans des eaux souterraines jeunes appropriées [3].

## L'air emprisonné dans le sol

Il existait donc un besoin important d'une nouvelle approche des échanges gazeux dans les eaux souterraines prenant davantage en compte les rapports réels existant dans le sol entre l'eau et l'air et livrant de surcroît une prévision réaliste du comportement de l'hélium.

Contrairement à ce que les termes laissent supposer, il existe dans le profil du sol une transition continue entre la zone non saturée (interstices remplis d'air et d'eau) et la zone saturée (interstices remplis uniquement d'eau). Dans cette zone transitoire quasi saturée, entre 10 et 20% des pores restent remplis d'air. L'air intersticiel y reste emprisonné et immobilisé. Cet air emprisonné ou «entrapped air» contrôle d'une manière prépondérante la formation d'eau phréatique étant donné qu'il présente un obstacle temporaire mais efficace à l'infiltration.

Même si l'«entrapped air» a été bien étudié par la pédologie, ce sont nos travaux qui les premiers ont établi une relation fonctionnelle entre «excess air» et «entrapped air» et

mis ainsi l'étude des échanges gazeux dans les eaux souterraines sur une nouvelle base [4, 5]. Les vitesses d'écoulement de l'eau sont très faibles dans la zone quasi saturée (1 m par jour ou moins); de plus, la pression y est de 5 à 10% plus élevée que la pression atmosphérique sous l'effet du surcroît de charge hydrostatique. On peut donc supposer qu'à cause de la pression localement plus élevée, il s'établit un nouvel équilibre entre l'air emprisonné dans le sol et l'eau environnante, chaque gaz atteignant son propre équilibre de solution. Etant donné que l'air emprisonné constitue un réservoir gazeux limité par rapport à l'eau et qu'en même temps la pression dans les bulles doit correspondre à la pression externe, les pressions partielles à l'intérieur des bulles de gaz vont s'adapter aux nouvelles conditions. Par rapport à l'air non fractionné, la composition élémentaire des bulles de gaz va se décaler vers les gaz rares légers. Par contre l'eau s'enrichit par rapport à l'«excess air» pur en gaz rares lourds et plus solubles (Fig. 1).

Ce nouveau modèle d'échanges gazeux qui postule l'existence d'un équilibre entre l'eau souterraine et «entrapped air» prédit donc exactement l'excès relatif de gaz rares qui est typique des eaux souterraines. Il met en particulier les excès de gaz rares en relation avec des grandeurs physiques directement observables dans la zone quasi saturée, comme p. ex. la surpression due à l'eau en cours d'infiltration (Fig. 2), ce qui fait de l'«excess air» un paramètre supplémentaire pour les interprétations d'ordre paléoclimatique [5–7]. D'autre part, le modèle proposé est à l'heure actuelle le seul concept à pré-

dire des concentrations d'hélium atmosphériques «réalistes» au sens statistique du terme.

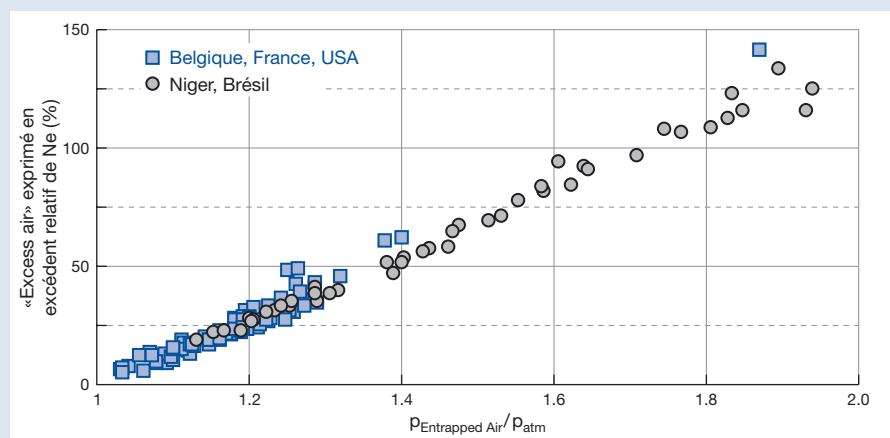
## Conclusion: Une datation exacte de l'eau souterraine

En rétrospective, on constate que la nouvelle approche a non seulement étendu les conceptions actuelles sur les échanges gazeux, et ainsi établi des bases physiques solides pour la détermination de la température à l'aide de gaz rares, mais qu'elle a également amélioré considérablement la qualité de la datation au  $^3\text{H}\text{-}^3\text{He}$  des eaux souterraines jeunes. Le modèle donne en général un âge de l'eau moins élevé et donc plus réaliste que les anciennes approches basées sur le fractionnement qui donnaient souvent des temps de séjour trop longs pour être crédibles.



**Rolf Kipfer**, physicien de l'environnement, dirige le groupe «Isotopes de l'environnement». Domaines de recherche: Méthodes utilisant des traceurs naturels pour l'étude des eaux souterraines et des lacs, méthodes numériques pour l'analyse de données et modélisation de systèmes aquatiques.

**Coauteurs:** Werner Aeschbach-Hertig, Urs Beyerle, Matthias Brennwald, Markus Hofer, Johannes Holocher, Frank Peeters



**Fig. 2:** «Excess air» dans des eaux souterraines situées à différentes latitudes. Les eaux souterraines des régions arides (Niger, Brésil) présentent généralement davantage d'«excess air» que celles des zones tempérées (Belgique, France, USA). Des échantillons prélevés au Niger dans des eaux souterraines âgées de plus de 5000 ans ont p. ex. des proportions d'«excess air» particulièrement élevées. Des études paléoclimatiques rapportent que le climat de la région actuelle du Sahel était alors beaucoup plus humide qu'aujourd'hui («green Sahara»). On peut supposer que ces conditions humides ont favorisé la recharge des nappes phréatiques et que cette période était caractérisée par une oscillation importante du niveau des nappes. L'augmentation consécutive de la surcharge hydraulique a alors induit une augmentation de pression dans la zone quasi saturée, ce qui a finalement entraîné une libération accrue d'«excess air» dans les eaux souterraines [6].

- [1] Hohmann R., Kipfer R., Kocsis O., Peeters F., Schurter M., Sturm M., Imboden D. (1996): Den Geheimnissen des Baikalsees auf der Spur. In: EAWAG-Jahresbericht, Dübendorf, p. 3–8.
- [2] Imboden D. (1994): Der Vierwaldstättersee – fast ein helvetischer Ozean. In: EAWAG-Jahresbericht, Dübendorf, p. 7–12.
- [3] Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Beyerle U., Kipfer R. (1999): Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters. *Water Resources Research* 35, 2779–2792.
- [4] Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Beyerle U., Kipfer R. (2000): Palaeotemperature reconstruction from noble gases in ground water taking into account equilibration with entrapped air. *Nature* 405, 1040–1044.
- [5] Holocher J., Peeters F., Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Braunwald M., Hofer M., Kipfer R. (2000): New insights into the processes controlling the formation of excess air in ground water. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union, San Francisco*, 81, F 441.
- [6] Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Holocher J., Peeters F., Kipfer R. (2001): Excess in groundwater as a potential indicator of past environmental changes. In: International conference on the study of environmental change using isotope techniques, IAEA, Vienna, p. 34–36.
- [7] Peeters F., Beyerle U., Aeschbach-Hertig W., Holocher J., Kipfer R. (2000): Recharge temperature, excess air fractionation and groundwater dating: improving the analysis by including noble gas isotopes, *EOS, Trans. Am. Geophys. Union, San Francisco*, 81, F 440–441.