

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg  
**Herausgeber:** Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles  
**Band:** 70 (1981)  
**Heft:** 1-2  
  
**Artikel:** L'eau dans les roches calcaires  
**Autor:** Müller, Imre  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-308593>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 30.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# L'eau dans les roches calcaires

par IMRE MÜLLER,  
Centre d'Hydrogéologie de l'Université,  
11, rue Emile-Argand, CH-2007 Neuchâtel, et  
Institut de Géologie de l'Université,  
Pérolles, CH-1700 Fribourg

## 1. Introduction

Le programme national de recherche sur le cycle de l'eau, financé par le Fonds National Suisse de la recherche scientifique, regroupe le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, l'Institut de Physique de l'Université de Berne et l'Institut de Géologie de l'Université de Fribourg, pour étudier les caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères calcaires du Jura et des Préalpes par des méthodes d'investigations indirectes. L'approche indirecte des propriétés hydrogéologiques des réservoirs calcaires est motivée par la difficulté qu'on rencontre dans la détermination directe de leurs caractéristiques hydrogéologiques et notamment du champ des perméabilités.

Des fractures et des chenaux, très perméables et organisés, découpent ces terrains très peu perméables en de nombreux «blocs». Cette double perméabilité qui caractérise les réservoirs calcaires, se manifeste également au niveau de l'infiltration. En effet, l'alimentation de l'aquifère se produit d'une manière hétérogène. Lors d'une précipitation, une partie seulement de l'eau s'infiltre d'une manière diffuse et est régulièrement distribuée sur l'ensemble de la surface du bassin versant. L'autre partie, non négligeable, ruisselle en surface, puis gagne le réseau karstique directement à travers les pertes.

La figure 1 montre comment ces venues d'eau massives dans le réseau provoquent une inversion du gradient hydraulique, au moins dans certaines parties du karst. Le niveau monte très rapidement dans les parties perméables du réservoir calcaire et, puisque les chenaux sont tous reliés, d'une manière ou d'une autre, entre eux et avec l'exutoire, le débit des sources augmente très rapidement lors d'une averse.

Quand l'alimentation cesse, le niveau diminue rapidement dans le réseau qui se vidange. C'est la décrue rapide des sources karstiques.

En période de tarissement, quand les chenaux sont déjà vidangés, ce sont les «blocs» peu perméables qui alimentent les sources. Il va de soi que *ces deux types de circulation d'eau au sein du réservoir calcaire se répercutent non seulement sur l'hydrogramme, mais aussi sur les paramètres physico-chimiques et isotopiques de l'eau.*

Ce phénomène de crue et décrue rapides et la variabilité physico-chimique de l'eau qui en résulte sont illustrés par l'hydrogramme de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois), pour la période du 20 mai au 20 juin 1979, sur la figure 2.

L'un des buts du Projet national d'hydrologie était d'explorer la variabilité de ces paramètres en fonction des événements hydrodynamiques pour en obtenir indirectement des renseignements qualitatifs et quantitatifs sur les volumes d'eau disponibles, sur le renouvellement et la localisation des réserves exploitables, ainsi que sur la qualité chimique et bactériologique des eaux karstiques.

De nombreuses approches indirectes ont été expérimentées pour étayer les hypothèses hydrogéologiques sur la nature du milieu dans les différentes parties du réservoir calcaire

(cf. fig. 1), pour ajuster les calculs du modèle mathématique et pour confirmer les résultats des décompositions exponentielles des courbes de tarissement et de décrue.

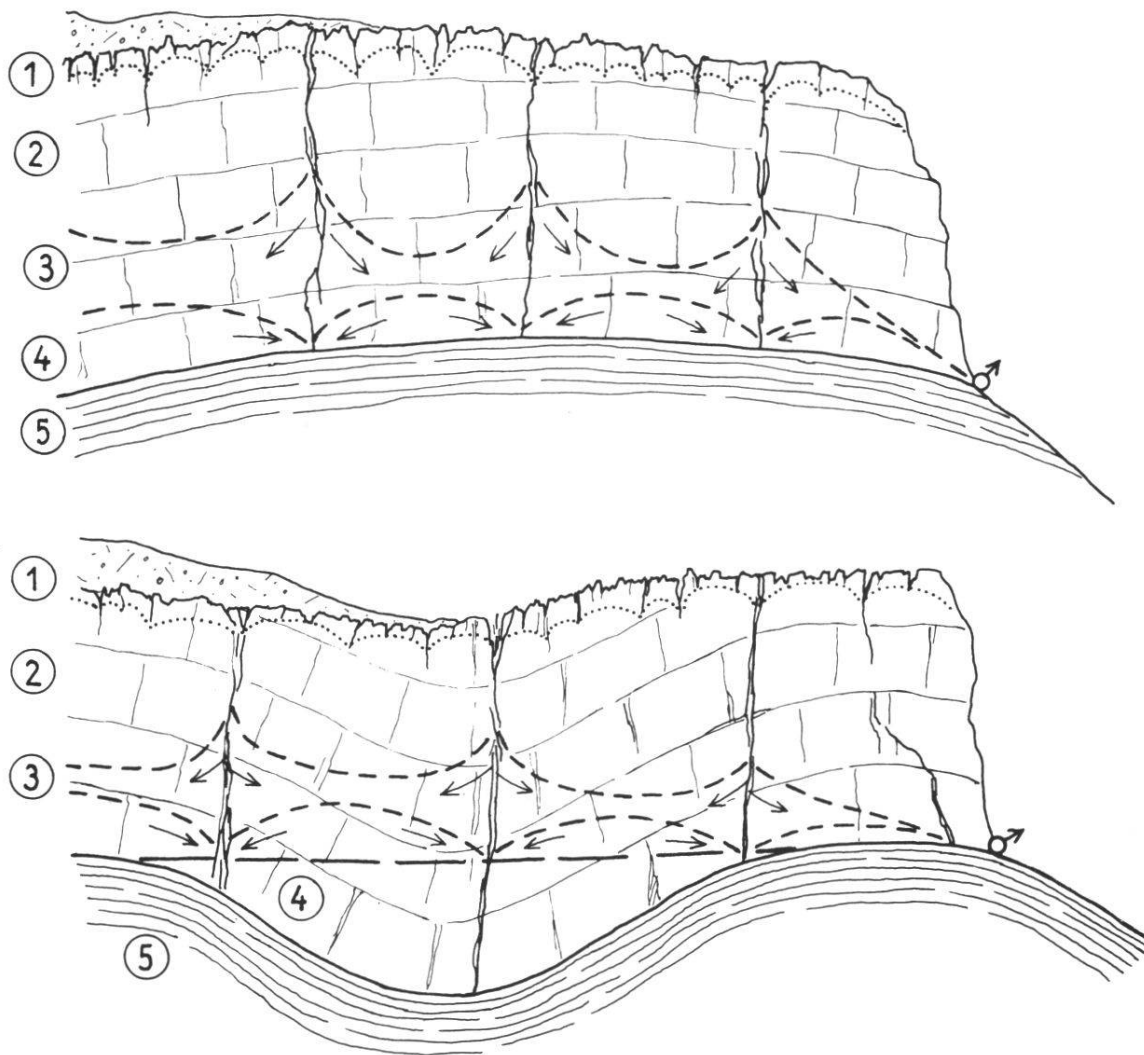


Fig. 1: Subdivisions hydrogéologiques dans deux structures différentes d'aquifères calcaires (1 = épikarst; 2 = zone non saturée; 3 = zone de battement de la nappe; 4 = zone saturée; 5 = formation imperméable). Selon les structures, les réserves non écoulables peuvent être considérables.

## 2. Les méthodes d'approches indirectes, mises en valeur par le Projet national

### 2.1. L'analyse de l'hydrogramme des sources karstiques

Les mécanismes hydrodynamiques qui régissent les aquifères karstiques, notamment au niveau de l'hétérogénéité de l'alimentation et de la perméabilité, ont déjà été étudiés par l'analyse et la décomposition des courbes de décrue en plusieurs exponentielles (BURGER, 1956; SCHÖLLER, 1967; FORKASIEWICZ and PALOC, 1967; KIRALY et MOREL, 1976). Le choix des segments exponentiels constitue cependant une difficulté, car, basé sur l'allure graphique de la courbe, il reste malgré tout assez subjectif.

Une des acquisitions importantes du Projet national du karst est l'élaboration d'une technologie d'enregistrement en continu des paramètres physico-chimiques de l'eau, qui

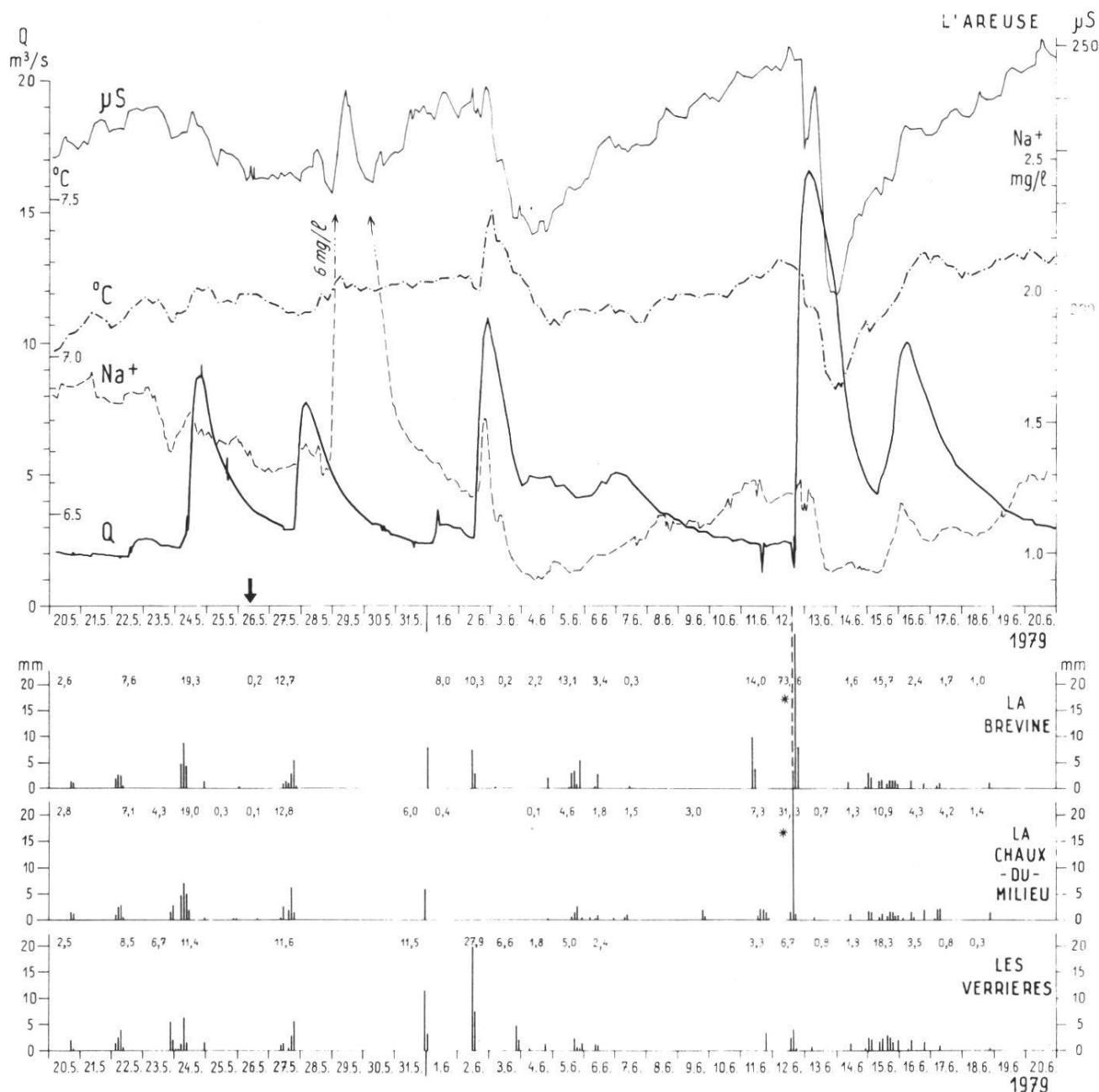


Fig. 2: Synthèse des informations hydrologiques, météorologiques et de la variabilité des paramètres physico-chimiques (enregistrement en continu) à la source de l'Areuse, du 20 mai au 20 juin 1979.

Flèche = injection des traceurs du 4<sup>e</sup> SUWT

Etoile = orage de grêle

La Brévine, La Chaux-du-Milieu, Les Verrières = station pluviographique avec cumul de 2 heures des précipitations (mm) et indication chiffrée des totaux journaliers.

μS = conductibilité électrique à 10°C

Na<sup>+</sup> = activité de l'ion Sodium à 10°C

Q = débit

°C = température de l'eau

permet de détecter, lors d'alimentation intense, le moment à partir duquel l'eau récemment infiltrée dans le réseau karstique n'alimente plus l'exutoire, dont le débit est alors presque exclusivement fourni par les «blocs» peu perméables du karst. Le début du tarissement sur l'hydrogramme sera de ce fait choisi en fonction d'un «plateau» vers lequel tendent certains paramètres enregistrés, puisque leur stabilisation indique que les infiltrations d'eau de surface n'influencent plus le régime d'écoulement à l'exutoire. Dès ce moment, ce sont les réserves qui coulent et leur évaluation quantitative devient plus fiable, grâce aux contrôles possibles de l'état hydrodynamique du système par le comportement des traceurs naturels de l'eau. Un exemple est donné par la figure 3. L'ion Sodium sert de traceur naturel pour estimer le début du tarissement (HAESLER, 1981).

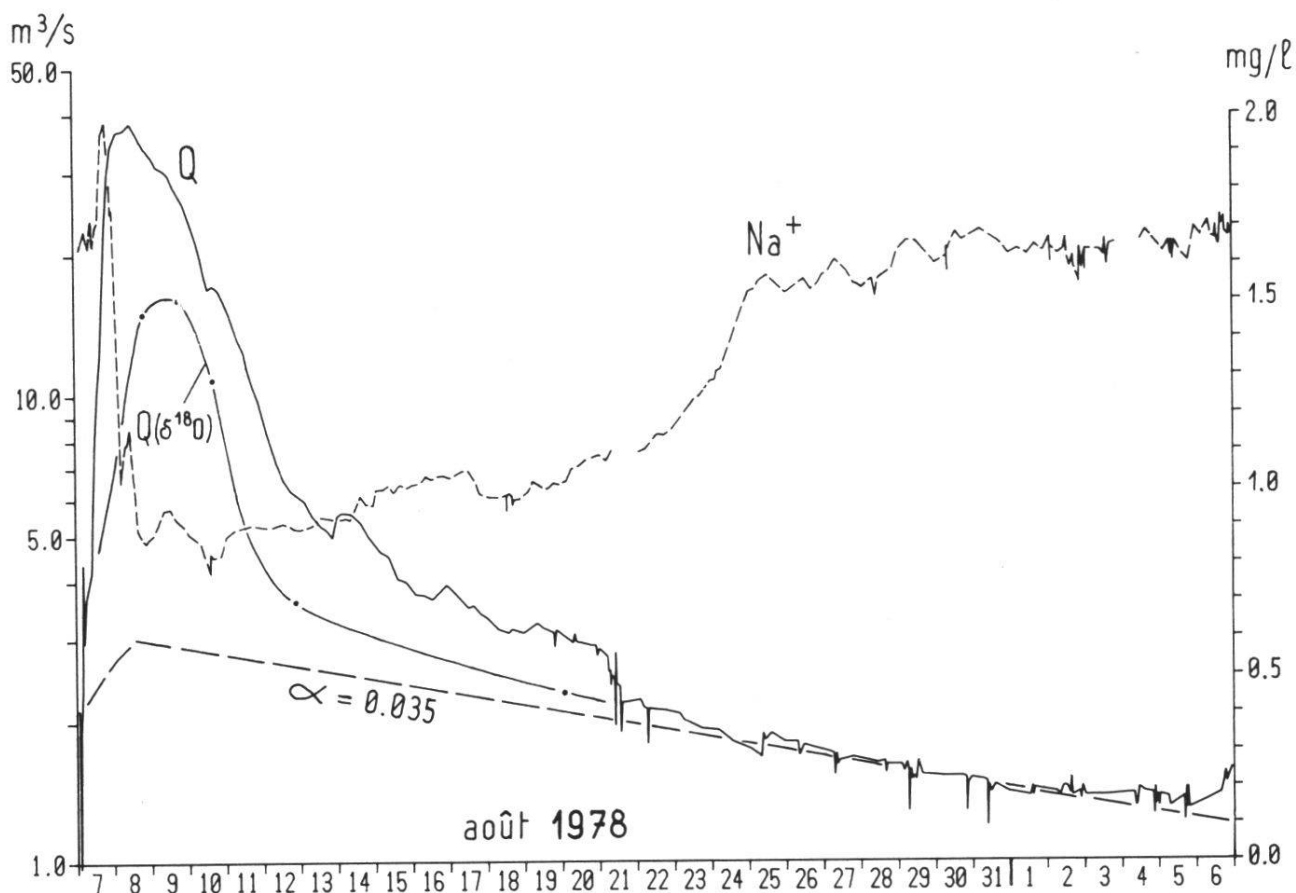


Fig. 3: L'analyse de la crue du 8 août 1978. L'effet «piston» est bien visible grâce à l'enregistrement de l'ion Sodium. La stabilisation de cet ion indique le début du tarissement. Le coefficient du tarissement  $\alpha$  peut donc être estimé avec plus de sécurité. Le débit calculé à partir d'un isotope naturel ( $\delta^{18}\text{O}$ ) met en évidence les volumes considérables des «réserves» qui participent à la crue. Ces volumes se trouvent dans les zones très perméables de l'aquifère.

## 2.2. La variabilité des paramètres chimiques et isotopiques en fonction de l'hydrodynamique: les traceurs naturels

La variabilité des différents paramètres physico-chimiques, isotopiques et bactériologiques de l'eau, envisagés comme traceurs naturels, a été mesurée et enregistrée en continu, en même temps que le débit à l'exutoire et les événements pluviométriques sur le bassin (cf. fig. 2). Ce système d'observation sophistiqué a permis d'analyser en détail le mécanisme des crues et de préciser la nature et la qualité des réserves en eau exploitables. Il est important

de souligner que les *dilutions* observées à l'aide du comportement des traceurs isotopiques et chimiques (Tritium,  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\text{Na}^+$ ) lors des grandes crues de la source de l'Areuse ne dépassent pas 20 % à 40 %. L'eau fraîchement infiltrée arrive à la source avec 20 à 30 heures de retard sur le début des averses. La plus grande partie des volumes qui constituent les crues (60 % à 80 %) est encore de l'eau «âgée» minéralisée et de qualité bactériologique encore acceptable. La figure 4 montre l'évolution bactériologique d'une crue. Les eaux oxygénées, fraîchement infiltrées, véhiculent beaucoup de bactéries, mais la montée de la crue est encore de l'eau ancienne et de meilleure qualité bactériologique. On doit admettre que des volumes d'eau considérables sont accumulés dans les zones perméables de l'aquifère sous forme de «réserves» au moment de la crue et ne proviennent pas des zones peu perméables du karst (des «blocs») pendant la crue. Ainsi l'analyse des mouvements des traceurs naturels permet-elle d'évaluer, par les taux de dilutions, une partie importante des réserves qui se trouvent dans les zones très perméables de l'aquifère karstique.

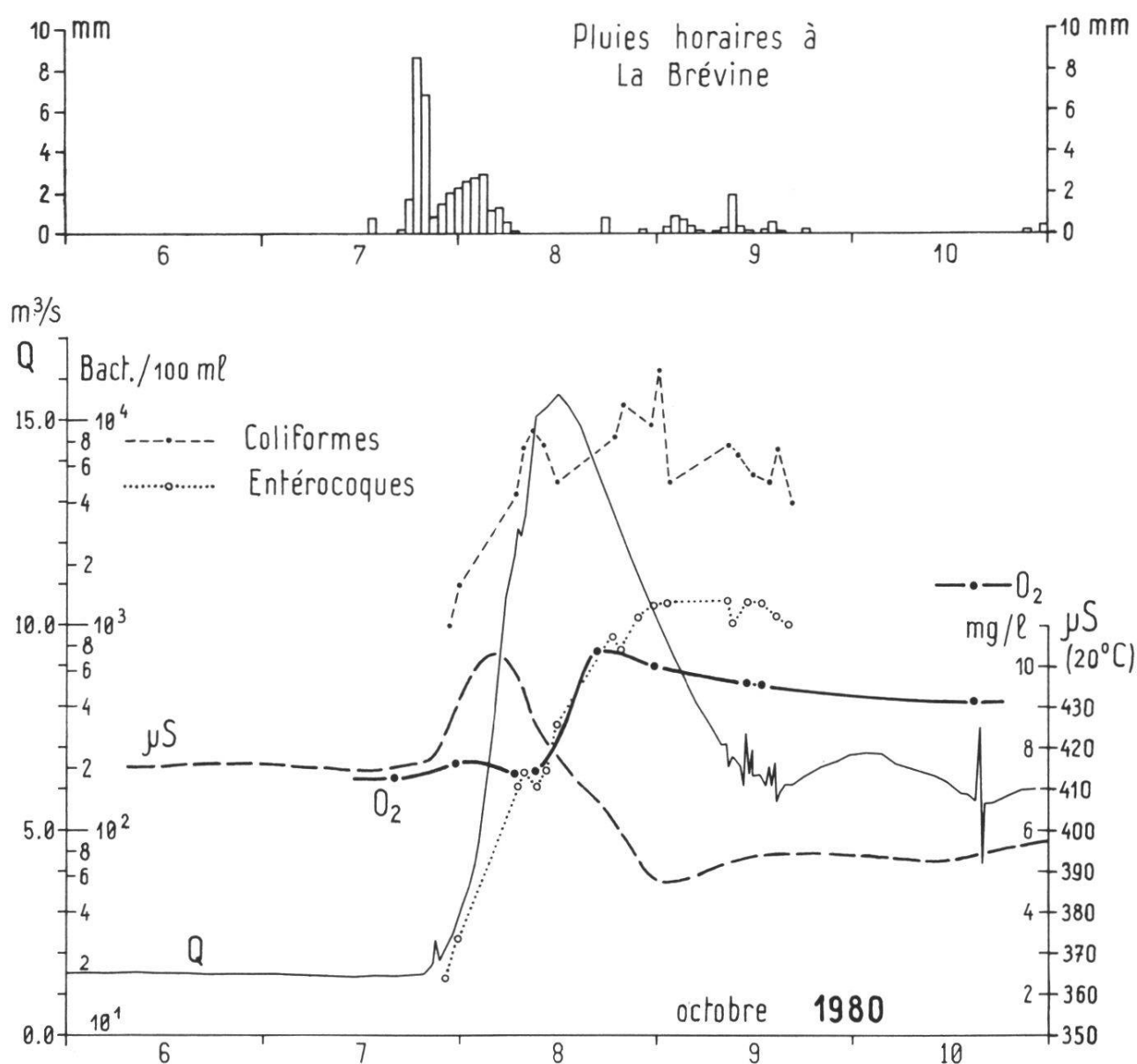


Fig. 4: L'évolution bactériologique et la variation de la teneur en oxygène dissous lors d'une crue à la source de l'Areuse.



### *2.3. Les méthodes de traçages à l'aide de traceurs artificiels*

Dans le cadre du 4<sup>e</sup> SUWT (Symposium Underground Water Tracing), le Projet national a bénéficié de l'appui scientifique et matériel de dix instituts universitaires de quatre pays différents. Un multitraçage a été effectué par le 4<sup>e</sup> SUWT dans le bassin de la source de l'Areuse, pour vérifier les limites du bassin, mettre en évidence les conditions de diffluences et d'affluences des eaux, comparer le comportement des traceurs artificiels avec celui des traceurs naturels et établir les vitesses de transport des substances injectées.

D'importantes vérifications ont été obtenues concernant la structure de l'aquifère et le comportement hydrogéologique des accidents tectoniques. Grâce à de nouvelles techniques d'extraction à partir du charbon actif, le dosage des traceurs fluorescents renseigne sur la restitution à long terme des substances. Les traceurs fluorescents étaient encore bien détectables une année après leur injection (MÜLLER und ZÖTL, 1980).

En collaboration avec le Laboratoire de Microbiologie de l'Université de Neuchâtel, des traçages ont été entrepris avec succès, à l'aide de bactériophages. Les résultats sont excellents (ARAGNO et MÜLLER, 1981). Les bactériophages sont des virus qui apparaissent comme une nouvelle «famille» de traceurs. Non toxiques et non pathogènes, ils présentent beaucoup d'avantages sur les traceurs chimiques conventionnels, salissants et onéreux.

### *2.4. L'exploration géophysique*

La localisation des zones fracturées très perméables est importante non seulement en vue de l'implantation d'ouvrages de captage, mais également pour la protection des réserves exploitables. La prospection géophysique entreprise à l'aide des méthodes sismiques et électriques est basée sur la détection des anomalies géophysiques qui sont les conséquences des zones fracturées dans le karst. Les tests exécutés sur des sites reconnus par la géologie donnent de bons résultats, à condition que la ligne d'émission des dispositifs de mesure soit adaptée à l'anomalie recherchée (MÜLLER, 1980).

## **3. Résultats obtenus**

### *3.1. Les réserves écoulables du bassin de l'Areuse*

L'analyse de l'hydrogramme de la source de l'Areuse, entreprise sur plusieurs périodes de long tarissement, et l'analyse du comportement des traceurs naturels de l'eau, ont permis de recalculer les réserves écoulables du bassin. Il s'agit de volumes d'eau emmagasinés au-dessus du niveau de l'exutoire (cf. fig. 1). D'après HAESLER (1981), les réserves écoulables sont:

$$V_{\text{écoulable}} = 7 - 9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

### *3.2. Les réserves permanentes*

Les isotopes naturels de l'eau, notamment le Tritium, permettent de calculer le renouvellement des réserves et l'«âge moyen» de l'eau emmagasinée dans le bassin. MÜLLER, KIRALY, SCHOTTERER et SIEGENTHALER (1980) ont établi les valeurs suivantes pour le bassin de la source de l'Areuse:

Séjour moyen de l'eau dans le bassin

$T = 9 \text{ mois à } 2 \text{ ans}$

A l'aide du débit moyen, fourni par le réservoir ( $Q_R$ ) et le temps de séjour moyen ( $T$ ), ils calculent les volumes totaux ( $V_\tau$ ) (y compris également ceux qui sont *au-dessous* du niveau de l'exutoire, cf. fig. 1) emmagasinés dans le réservoir:

$$V_\tau = Q_R \cdot T = 0,9 - 2,4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$$

En comparaison des valeurs trouvées pour les réserves écoulables, les réserves totales sont 10 à 20 fois plus importantes. Cela s'explique par la structure de l'aquifère.

### *3.3. La localisation des réserves*

L'analyse des crues à l'aide des traceurs isotopiques et chimiques permet de constater qu'une partie très importante des réserves se trouve dans la zone noyée et dans les parties très perméables du karst. La figure 3 illustre la fraction du débit d'eau ancienne ( $Q \delta^{18}O$ ) pour une grande crue de la source de l'Areuse. La dilution par les masses d'eaux fraîchement infiltrées, calculée à partir des teneurs isotopiques et chimiques, est relativement faible et c'est surtout l'eau ancienne qui alimente l'exutoire pendant la crue à partir des zones très perméables du karst (cf. zone no 4 de la fig. 1). Ces zones, à condition qu'elles soient à l'abri des infiltrations rapides depuis la surface, contiennent de l'eau «âgée», c'est-à-dire de bonne qualité, qui pourrait être exploitée par forage.

La localisation sur le terrain des zones fracturées et perméables a été abordée par la prospection géophysique, grâce à des mesures géoélectriques et microsismiques. Des résultats importants ont été obtenus, concernant l'orientation et la nature de certaines anomalies qui correspondent à des zones très fracturées du karst.

### *3.4. La qualité chimique et biologique des eaux karstiques*

Les analyses effectuées à tous les niveaux du karst (cf. fig. 1) mettent nettement en évidence que les parties du réseau karstique qui sont en communication directe avec la surface (pertes, dolines) véhiculent des eaux de mauvaise qualité, surtout lors des crues (MÜLLER, 1980b). Les paramètres physico-chimiques et isotopiques varient brusquement pendant les périodes de précipitations. La figure 4 illustre la dégradation de la qualité bactériologique de l'eau à la source de l'Areuse lors d'une crue. Celle-ci correspond à l'arrivée de l'infiltration concentrée des eaux souillées qui ont lessivé la surface du bassin. Par contre, les régions du karst, protégées par une couverture imperméable, et les captages qui exploitent des fractures dans les zones profondes de l'aquifère échappent aux influences des infiltrations concentrées: ils fournissent de l'eau de bonne qualité. Les paramètres physico-chimiques et isotopiques de l'eau ne sont alors pratiquement pas influencés par des averses isolées. La qualité bactériologique est généralement excellente. Tel est notamment le cas des captages des Moyats (MÜLLER und ZÖTL, 1980).

### *3.5. La protection des réserves*

La connaissance de la nature et de la puissance de la couverture meuble sur le karst est indispensable pour élaborer une carte de vulnérabilité des aquifères calcaires. La localisation des zones fracturées et perméables est également nécessaire. Les premières



investigations concrètes, à l'aide de la géophysique, nous ont permis d'obtenir des renseignements fiables sur la nature et l'épaisseur de la couverture quaternaire. Ces sondages sont encore en phase expérimentale et leur nombre est insuffisant. Néanmoins les résultats déjà obtenus sont très encourageants aussi bien pour l'estimation de la nature et l'épaisseur des formations meubles que pour la localisation des zones particulièrement vulnérables, telle la présence du réseau en subsurface (MÜLLER, 1980a). Des directives précises sont également en voie d'élaboration pour définir les différentes catégories de «sites» de protection (BURGER, 1979).

## Remerciements

L'auteur exprime sa reconnaissance à MM. les Professeurs A. Burger, C. Caron, à MM. Dr. L. Kiraly, Dr. U. Siegenthaler et U. Schotterer pour les discussions constructives et les critiques scientifiques. Il redit ses chaleureux remerciements à Mme F. Mauroux et à M. G. Papaux pour la correction et la dactylographie du manuscrit et le dessin des figures. Ces recherches ont été effectuées dans le cadre du Programme national sur le cycle de l'eau, financé par le Fonds National Suisse de la recherche scientifique. Que cette institution trouve ici l'expression de notre gratitude.

## Résumé

L'étude hydrogéologique des aquifères calcaires est abordée par des méthodes d'approches indirectes: étude de la variabilité des paramètres physico-chimiques, ainsi que celle de la variabilité isotopique et bactériologique de l'eau en fonction de l'hydrodynamique; essais de traçages et investigations géophysiques. Elles ont permis de compléter nos connaissances sur de nombreux points de l'hydrogéologie karstique. Le renouvellement des réserves en eau du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois) a pu être estimé à environ un an. Le volume d'eau emmagasiné a été évalué à cent millions de m<sup>3</sup>. Une bonne partie des réserves disponibles est localisée dans les zones très perméables (zone noyée). La qualité chimique et bactériologique de l'eau karstique est en voie de dégradation et devrait susciter des mesures urgentes de protection.

## Bibliographie

- ARAGNO, M., et MÜLLER, I.: Premières expériences de traçage des eaux souterraines dans le karst du Jura neuchâtelois (Suisse) à l'aide de bactériophages. Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel (1981, sous presse).
- BURGER, A.: Interprétation mathématique de la courbe de décroissance du débit de l'Areuse. Bull. Soc. Neuchâtel. Sci. nat. 79, 49–54 (1956).
- : Recherche de critères pour la protection des eaux souterraines karstiques contre la pollution. Application au Jura suisse. Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 3, 115–155 (1979).
- FORKASIEWICZ, J., et PALOC, H.: Le régime de tarissement de la Foux de la Vis. Chronique d'Hydrogéol. 10, 59–73 (1967).

- HAESLER, P.L.: Quelques considérations sur les courbes de décrue et de tarissement de la source de l'Areuse. Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 4 (1981, sous presse).
- KIRALY, L., et MOREL, G.: Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulé par modèle mathématique. Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 1, 37-60 (1976).
- MÜLLER, I.: La localisation des zones fracturées dans le karst par la prospection géoélectrique et microsismique. Eclogae geol. Helv. 73, 855-866 (1980a).
- : Quelques aspects de la pollution bactériologique et chimique des sources karstiques du Jura neuchâtelois. Actes du Coll. nat. sur la protection des eaux souterraines. Besançon, avril 1980, 263-283 (1980b).
- , KIRALY, L., SCHOTTERER, U., und SIEGENTHALER, U.: Untersuchung des Neuenburger Jura. In: MÜLLER, I., und ZÖTL, J.G. (Edit.): Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). Steir. Beitr. Hydrogeol. 32, 5-100 (1980).
- , und ZÖTL, J.G.: Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). Steir. Beitr. Hydrogeol. 32, 5-100 (1980).
- SCHOELLER, H.: Hydrodynamique dans le karst (écoulement et emmagasinement). Chronique d'Hydrogéol. 10, 7-21 (1967).