

<b>Zeitschrift:</b>	Eclogae Geologicae Helvetiae
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Geologische Gesellschaft
<b>Band:</b>	75 (1982)
<b>Heft:</b>	1
<b>Artikel:</b>	Etude des caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères karstiques par leurs réponses naturelles et provoquées
<b>Autor:</b>	Müller, Imre / Schotterer, Ulrich / Siegenthaler, Ulrich
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-165216">https://doi.org/10.5169/seals-165216</a>

### 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:** 21.02.2026

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

# Etude des caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères karstiques par leurs réponses naturelles et provoquées<sup>1)</sup>

Par IMRE MÜLLER<sup>2)</sup>, ULRICH SCHOTTERER<sup>3)</sup> et ULRICH SIEGENTHALER<sup>3)</sup>

## RÉSUMÉ

Les premiers résultats du Programme National sur le cycle de l'eau en pays calcaires ont été présentés et discutés lors de la réunion du 5 juin 1981 du Groupe suisse de l'Association Internationale des Hydrogéologues à Neuchâtel. Ce programme de recherche, financé par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique, fait appel à des méthodes d'investigations indirectes, géochimiques, géophysiques, isotopiques, pour explorer les propriétés hydrogéologiques des aquifères calcaires. Il ouvre des voies nouvelles pour la mise en valeur, la gestion et la protection de ces réservoirs. La réunion s'est terminée par la visite de la source de l'Areuse et du synclinal de la Brévine.

## 1. Introduction

L'étude hydrogéologique des réservoirs calcaires est une nécessité urgente à l'échelle nationale, compte tenu des problèmes d'approvisionnement en eau dans de nombreuses communes des cantons de Neuchâtel, de Berne et du Jura. Dans le cadre du Programme National sur le Cycle de l'Eau, 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 ont entrepris, dès 1977, l'étude structurale et hydrodynamique des aquifères karstiques par leurs réponses naturelles et provoquées.

Cette approche indirecte des propriétés hydrogéologiques des réservoirs calcaires est motivée par la difficulté que l'on rencontre dans la détermination directe de leurs caractéristiques hydrogéologiques, notamment du champ des perméabilités.

En effet, *des fractures et des chenaux, très perméables* et organisés en réseau de drainage, découpent *des masses calcaires très peu perméables* en de nombreux «blocs». Cette double perméabilité, difficile à explorer par des forages et des essais de pompage, se manifeste également au niveau de l'infiltration; celle-ci se produit d'une manière hétérogène. Lors de précipitations, seule une partie de l'eau s'infiltra

<sup>1)</sup> Résumé des premiers résultats du Projet National d'Hydrologie sur le karst lors de la réunion du Groupe suisse de l'Association Internationale des Hydrogéologues à Neuchâtel, le 5 juin 1981.

<sup>2)</sup> Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 11, rue Emile Argand, CH-2007 Neuchâtel.  
Institut de Géologie, Université de Fribourg, Pérrolles, CH-1700 Fribourg.

<sup>3)</sup> Institut de Physique, Université de Berne, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Berne.

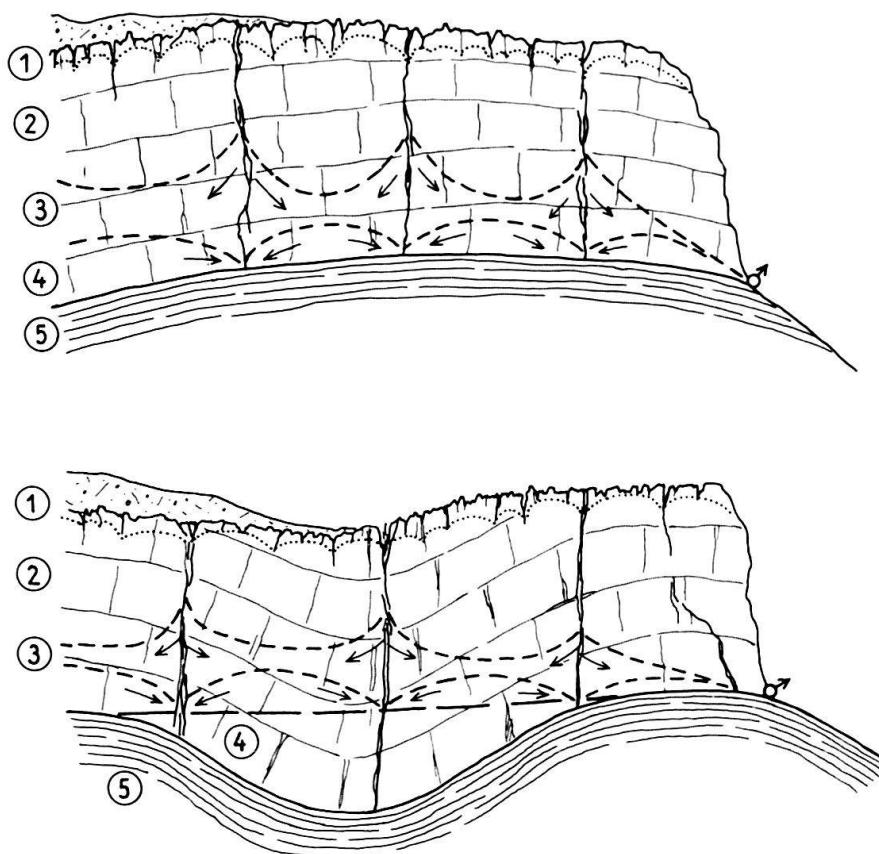


Fig. 1. Coupe schématique de deux réservoirs calcaires de structure géologique différente.  
1 = épikarst (MANGIN 1975). 2 = zone dénoyée. 3 = zone de battement de la nappe. 4 = zone noyée (où les réserves non écoulables peuvent être considérables). 5 = formations imperméables.

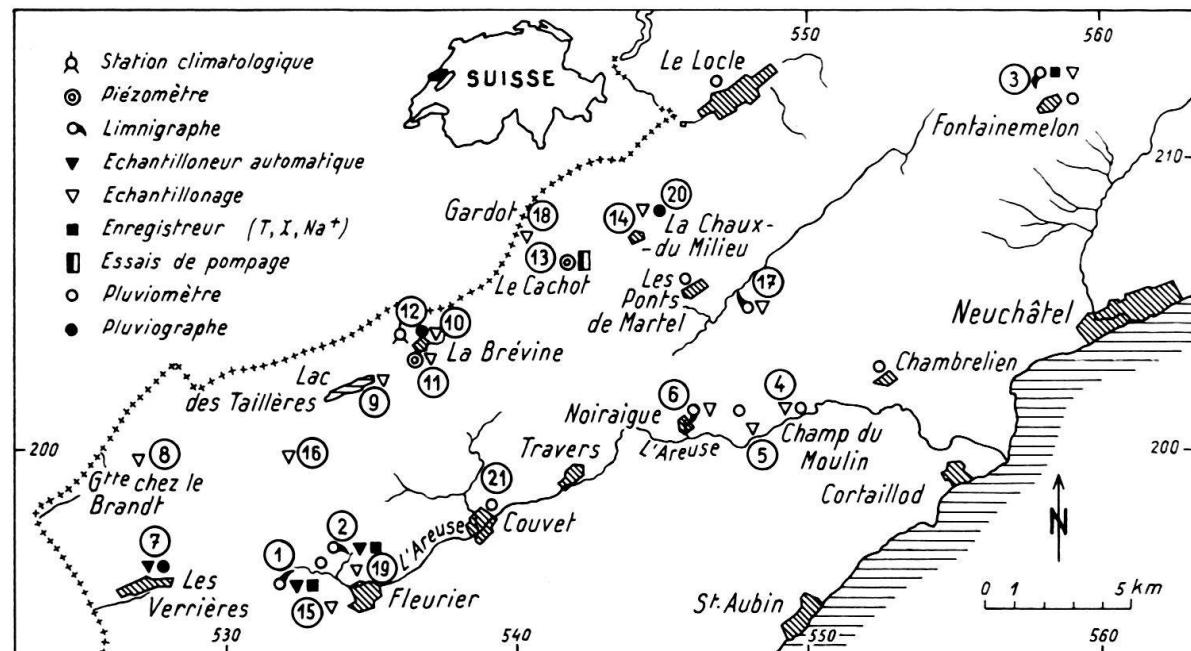


Fig. 2. Le système d'observation hydro-météorologique et l'emplacement des stations de prélèvements (1-21) du Projet National dans le karst jurassien.

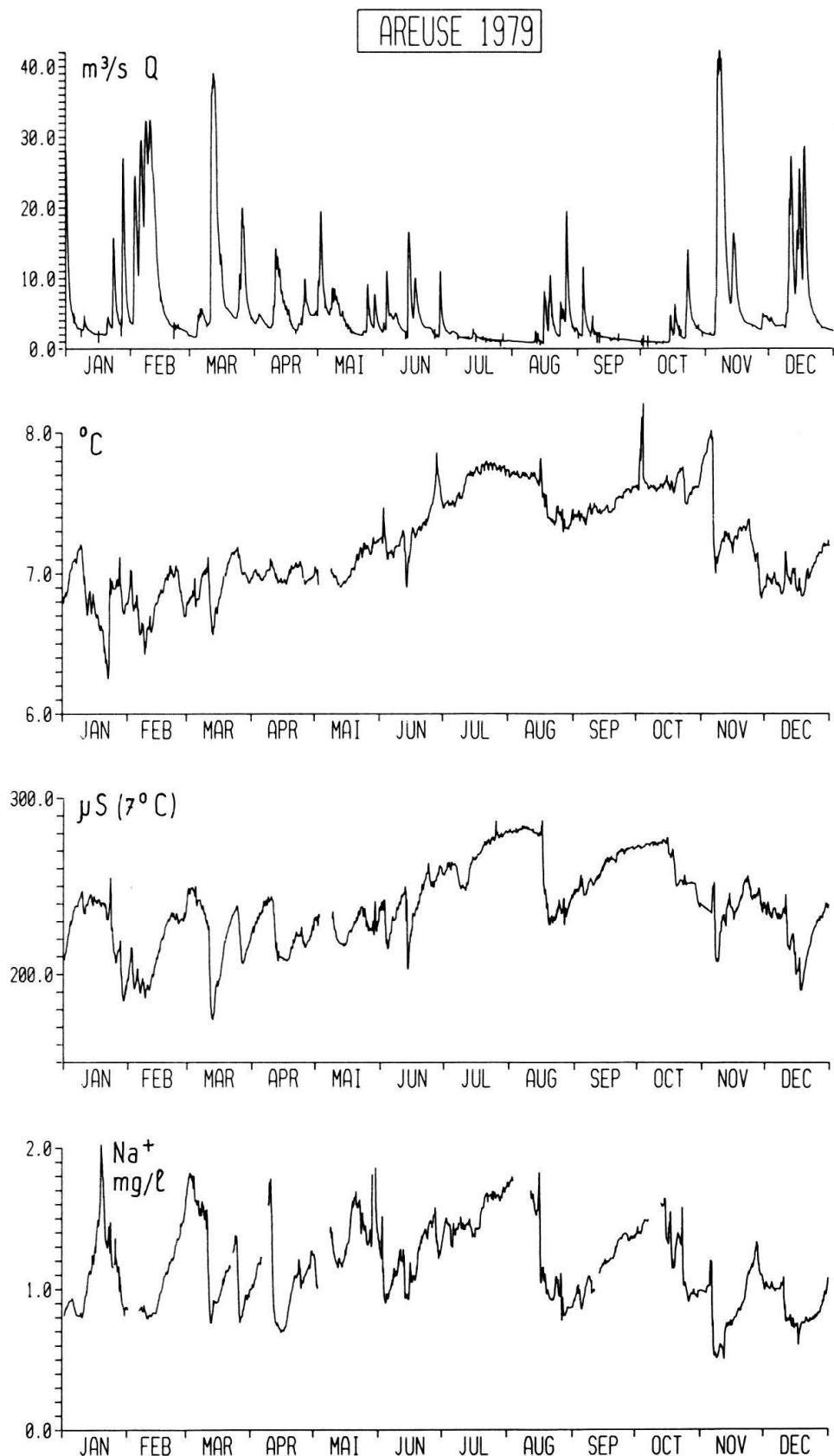


Fig. 3. Les variations des paramètres physico-chimiques de l'eau (température, conductibilité électrique et l'activité de l'ion Sodium) en fonction des débits à la source de l'Areuse.

de manière dispersée. L'autre partie, non négligeable, ruisselle en surface, puis gagne le réseau de drainage karstique directement à travers les pertes et les dolines.

La figure 1 montre comment ces venues d'eau massives dans le réseau influencent les niveaux dans les endroits très perméables et comment elles provoquent une inversion de gradient, au moins dans une partie du karst. Quand l'alimentation cesse, le niveau diminue rapidement dans le réseau qui se vidange. C'est la décrue des sources karstiques. En période d'étiage, ce sont les «blocs» peu perméables qui alimentent le réseau et assurent un faible débit à l'exutoire. Ces deux types de circulation, mis en évidence par l'allure des hydrogrammes des sources karstiques, se répercutent également sur les valeurs des paramètres physico-chimiques, isotopiques et bactériologiques des eaux (KIRALY & MÜLLER 1979). La variabilité de ces paramètres est l'un des outils de travail dans l'approche indirecte des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères karstiques. Pour saisir les variations des débits et le contenu chimique, isotopique et bactériologique des eaux à tous les niveaux du karst, un système d'observation moderne a été installé dans le Jura neuchâtelois (cf. fig. 2). Plusieurs sources ont été équipées d'appareils pour l'enregistrement en continu des paramètres, notamment de la température, de la conductibilité électrique de l'eau et de l'activité de l'ion sodium.

La source de l'Areuse a été choisie comme exemple. La figure 3 illustre bien la variabilité des paramètres en fonction des débits pour l'année 1979. Parallèlement aux enregistrements en continu, des échantilleurs automatiques ont été installés pour permettre l'analyse, au laboratoire, de nombreux autres paramètres. Un des buts du Projet National consistait à étudier la variabilité de ces *traceurs naturels* en fonction des événements hydrodynamiques, pour 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.

Deux multitraçages des eaux souterraines karstiques ont été réalisés afin d'explorer les limites du bassin et étudier les vitesses de transfert des *traceurs artificiels*. Des méthodes géophysiques, géoélectriques et microsismiques ont également permis la localisation des zones fracturées, ainsi que l'étude de la nature et de l'épaisseur de la couverture protectrice meuble sur le karst.

Bref, les méthodes d'approche indirecte dans l'exploration hydrogéologique des aquifères calcaires sont envisagées comme des moyens de contrôle concernant les hypothèses émises sur le milieu et sur les mécanismes hydrodynamiques qui y règnent. Elles soutiennent et seconcent les approches numériques: décomposition et analyse des hydrogrammes, ajustement des modèles mathématiques, estimation du renouvellement des réserves, évaluation des volumes d'eau disponibles dans les réservoirs.

## 2. Résumé des principaux résultats

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

La décomposition des courbes de décrue et de tarissement en plusieurs exponentielles est devenue une technique désormais classique (BURGER 1956, SCHÖLLER

1967, FORKASIEWICZ & PALOC 1967, TRIPET 1972, KIRALY & MOREL 1976). Cependant, le choix des segments exponentiels constitue une certaine difficulté, car, basé sur l'allure graphique de la courbe, il reste malgré tout assez subjectif.

L'une des acquisitions importantes du Projet National est l'élaboration d'une technologie d'enregistrement en continu des paramètres physico-chimiques de l'eau pour permettre de détecter, après des alimentations intenses, le moment à partir duquel l'eau récemment infiltrée dans le réseau karstique n'alimente plus l'exutoire, dont le débit est alors assuré par la vidange des «blocs» peu perméables du karst. Le début du tarissement sur l'hydrogramme sera de ce fait choisi, non seulement d'après l'allure graphique de l'hydrogramme, mais aussi en fonction d'un «plateau» vers lequel tendent les paramètres enregistrés. En effet, la stabilité de la composition de ces paramètres indique que les eaux fraîchement infiltrées dans les chenaux 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 4. L'ion sodium y sert de traceur naturel pour estimer le début du tarissement.

L'analyse de l'hydrogramme de la source de l'Areuse, effectuée sur plusieurs périodes de long tarissement à l'aide du comportement des traceurs naturels de l'eau, a permis à HAESLER (1981) de recalculer les réserves écoulables de ce bassin. Il

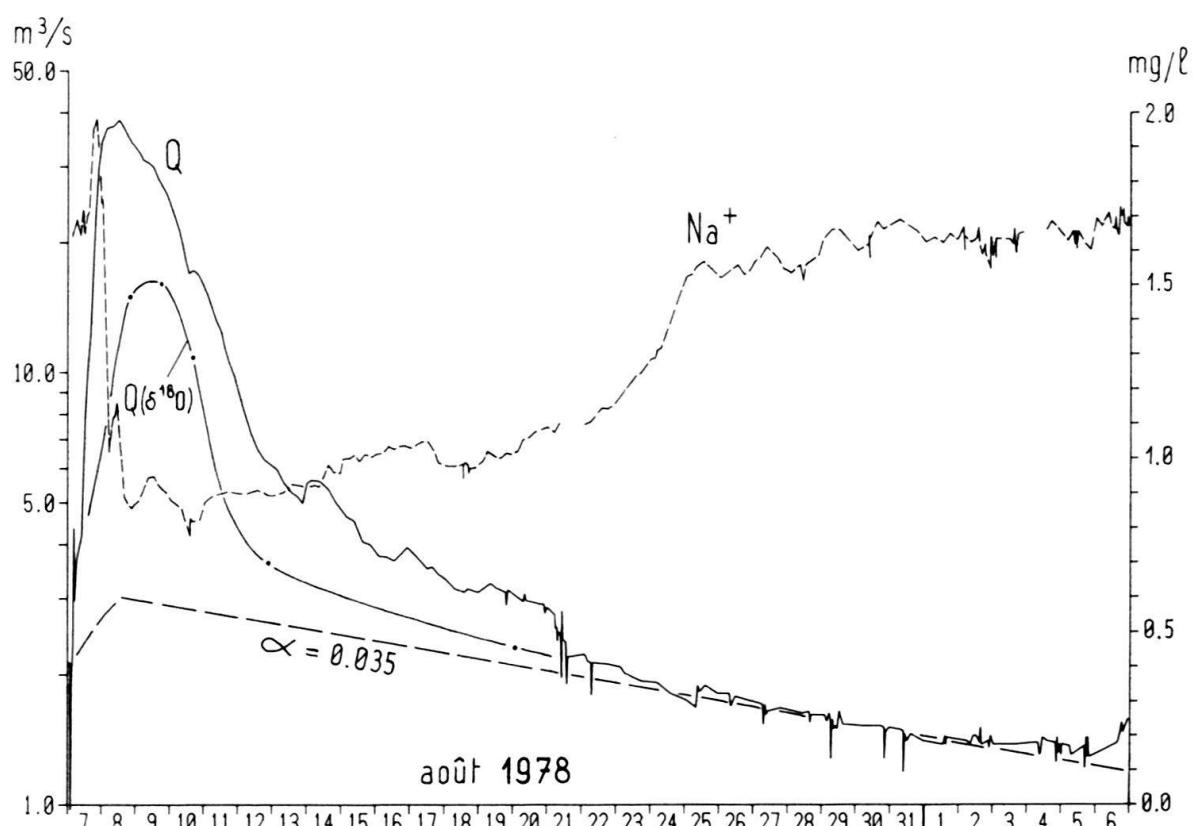


Fig. 4. L'analyse de la crue du 8 août 1978 de la source de l'Areuse.

$\text{Na}^+$  = activité de l'ion Sodium.  $Q(\delta^{18}\text{O})$  = débit établi à partir de l'analyse de  $^{18}\text{O}$ , constitué d'eau qui ne provient pas de l'averse du 6 et 7 août 1978.  $\alpha$  = coefficient de tarissement.

s'agit de volumes d'eau emmagasinés au-dessus du niveau de l'exutoire. Ces réserves sont de l'ordre de  $V_{\text{écoulable}} = 7-9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

## 2.2 Les réserves permanentes dans le bassin de la source de l'Areuse

Les masses d'eau piégées dans les structures géologiques, au-dessous du niveau de l'exutoire, peuvent être considérables (cf. fig. 1). Leur évaluation quantitative est abordée à l'aide des isotopes naturels de l'eau. Connaissant les concentrations du tritium et de  $^{18}\text{O}$  dans les précipitations et à l'exutoire, il est possible de calculer le temps de résidence de l'eau dans le réservoir et, par les taux de dilution, d'estimer le

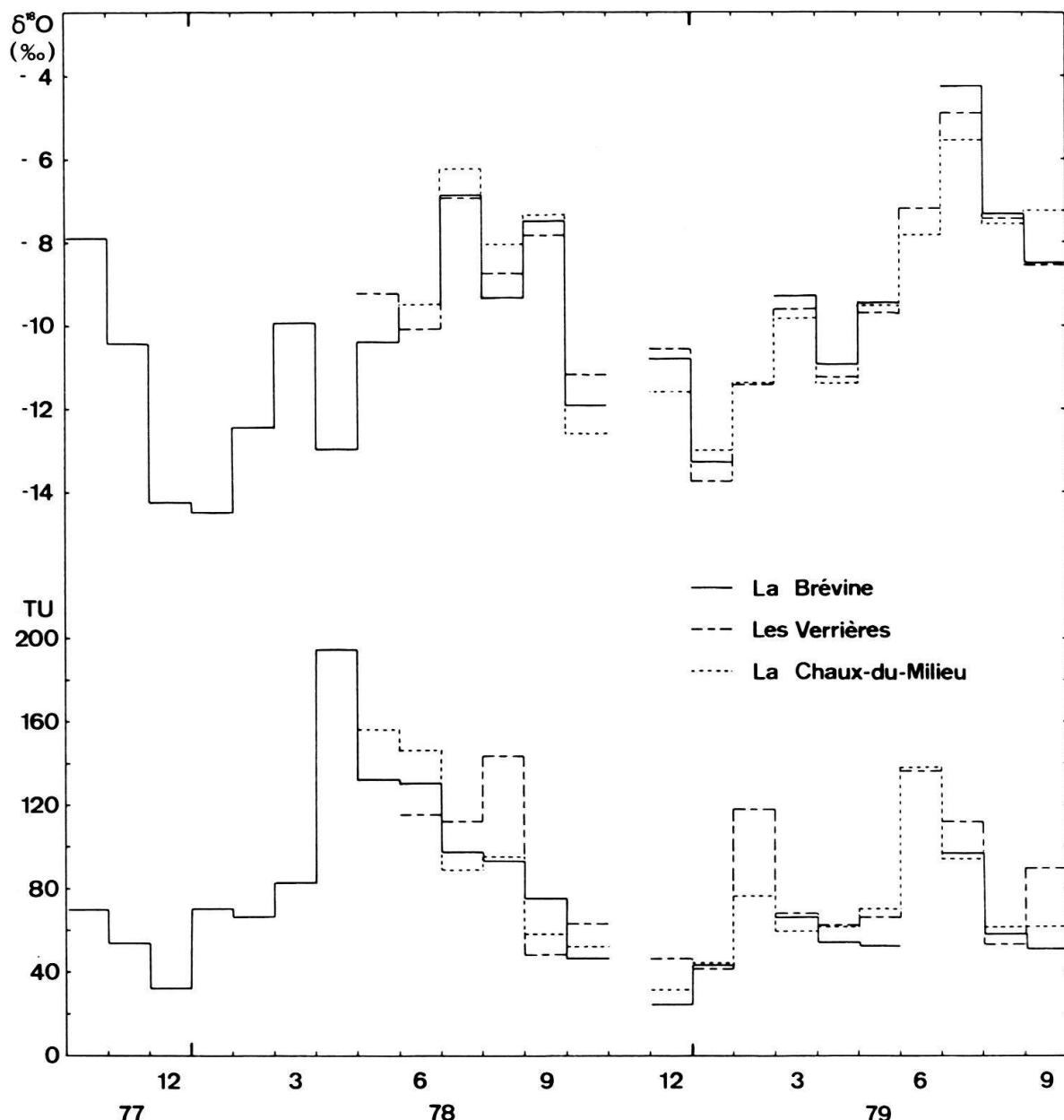


Fig. 5. Les concentrations des isotopes dans les précipitations. Analyses des échantillons mensuels des totalisateurs des trois stations pluviographiques: La Brévine, Les Verrières et La Chaux-du-Milieu (d'après MÜLLER et al. 1980).

renouvellement des réserves actives et leurs volumes (SIEGENTHALER & SCHOTTERER 1978, MÜLLER et al. 1980). La figure 5 illustre les valeurs isotopiques (tritium et  $^{18}\text{O}$ ) des précipitations, établies à partir des échantillons prélevés dans trois stations

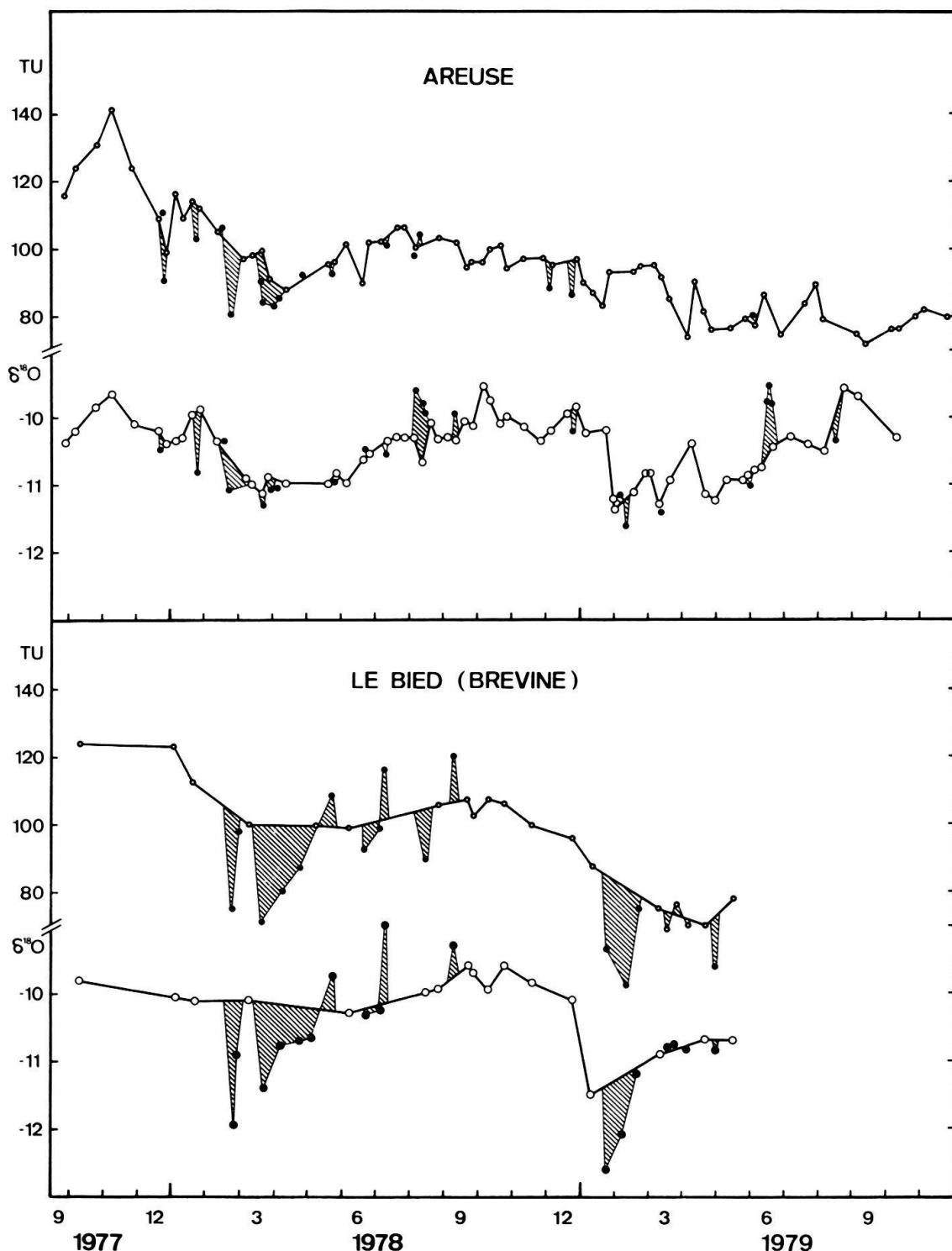


Fig. 6. Les concentrations des isotopes à la source de l'Areuse et dans le cours d'eau superficiel, Le Bied (Brévine). Echantillons isolés.

Cercles = basses eaux. Points = hautes eaux. Hachuré = périodes d'alimentation intense (d'après MÜLLER et al. 1980).

pluviographiques. Leurs variabilités à la source de l'Areuse et dans le petit cours d'eau superficiel qui se perd dans l'emposieu de la Brévine, Le Bied, sont illustrées par la figure 6. L'atténuation de la fluctuation de ces valeurs par rapport à celles des précipitations est due à la présence d'un réservoir de grande dimension, qui modère les effets de dilution dus aux précipitations et qui, par sa position géologique, se trouve au-dessous du niveau de l'exutoire (cf. fig. 1). Le volume d'eau qui y est emmagasiné, calculé à partir des valeurs isotopiques, est:  $V_{\text{permanent}} = 0,9-2,4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ .

Un ajustement des dilutions chimiques (conductibilité électrique et concentration de l'ion sodium) sur celles des isotopes au cours d'un mois où les mesures isotopiques ont été très fréquentes, est une nouvelle possibilité de calculer, jour par jour, le renouvellement des réserves d'eau à l'aide du chimisme (SCHOTTERER & MÜLLER 1981). Leur volume ainsi calculé serait:  $V_{\text{permanent}}: 1,1-2,9 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ .

### 2.3 La variabilité des paramètres chimiques et isotopiques en fonction de l'hydrodynamique

La variabilité des différents paramètres physico-chimiques, isotopiques et bactériologiques des eaux a permis d'analyser en détail le mécanisme des crues de plusieurs sources karstiques et de préciser la nature et la qualité des réserves en eau exploitable. Pour la source de l'Areuse, les dilutions observées lors des grandes

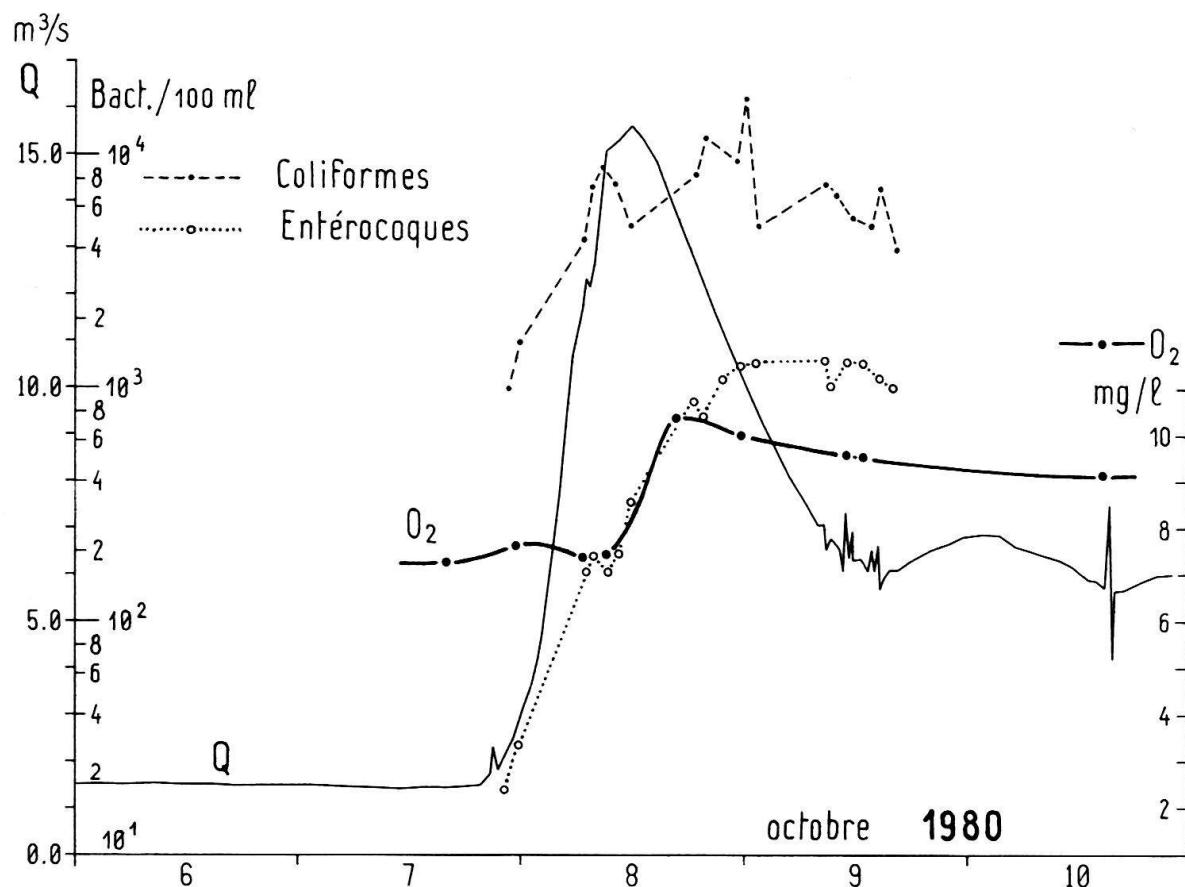


Fig. 7. L'évolution bactériologique et la variation de la teneur en oxygène dissous pendant la crue du 8 oct. 1980 de la source de l'Areuse.

crues, à l'aide des isotopes et du chimisme, montrent que seuls 20 à 40% de l'eau fraîchement infiltrée arrivent rapidement à l'exutoire dont le débit est constitué, pendant la crue, d'eau ne provenant pas directement des dernières précipitations.

La crue véhicule 60 à 80% d'eau qui a séjourné plus ou moins longtemps dans les zones très perméables du karst, sous le niveau de l'exutoire, et qui est mobilisée par la pression hydrostatique due à l'infiltration rapide lors des alimentations. Ce mécanisme est illustré sur la figure 4 pour une grande crue de la source de l'Areuse, où  $Q(\delta^{18}\text{O})$  signifie la quantité de l'«eau ancienne», déterminée à l'aide des mesures de  $^{18}\text{O}$ . Cette figure met en évidence non seulement les volumes importants des réserves qui participent à la crue, mais encore leur localisation dans les zones très perméables de l'aquifère. La figure 7 illustre également ce phénomène, analysé à l'aide de paramètres qui renseignent sur la qualité chimique et biologique des eaux. La montée de la crue est constituée d'eau de qualité bactériologique acceptable et peu oxygénée. C'est de l'eau qui a séjourné plus ou moins longtemps dans les conduits karstiques profonds. La vague d'eau fraîchement infiltrée, bien oxygénée, mais très polluée, arrive seulement 24 heures après le début de la crue. Les analyses effectuées à différents niveaux du drainage dans le karst (cf. fig. 1) mettent nettement en évidence que les parties du réseau karstique, qui sont en communication directe avec la surface, véhiculent des eaux de mauvaise qualité, surtout lors des crues. Par contre, les calcaires, protégés par une couverture meuble, ou les fractures, dans les zones profondes de l'aquifère échappant aux influences des infiltrations concentrées, fournissent des eaux de bonne qualité. Les paramètres chimiques et isotopiques ne sont alors pratiquement plus influencés par des alimentations, même intenses, et la qualité bactériologique reste bonne. Tel est notamment le cas des captages des Moyats (MÜLLER & ZÖTL 1980).

#### *2.4 Les investigations à l'aide des traceurs artificiels*

Encadré par le 4<sup>e</sup> Symposium International sur l'Utilisation des Traceurs en hydrologie (4<sup>e</sup> SUWT), le Projet National a bénéficié de l'appui scientifique et matériel de dix instituts universitaires de quatre pays. Le 26 mai 1979, 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 hydrogéologiques du bassin, mettre en évidence les conditions de diffluence et d'affluence, comparer le comportement des traceurs artificiels avec celui des traceurs naturels et établir les vitesses de transport des différentes substances injectées. Grâce à de nouvelles techniques d'extraction à partir du charbon actif, le dosage des traceurs fluorescents renseigne sur la restitution à long terme de ces substances. Elles étaient encore facilement détectables une année après leur injection.

La figure 8 illustre les voies de cheminement probables des dix traceurs, injectés dans sept pertes différentes (MÜLLER & ZÖTL 1980).

En collaboration avec le Laboratoire de Microbiologie de l'Université de Neuchâtel, une nouvelle famille de traceur est actuellement en cours d'expérimentation: il s'agit des bactériophages. Ces virus, non pathogènes et non toxiques, présentent beaucoup d'avantages sur les traceurs fluorescents, surtout pour les essais de traçages qui risquent de toucher de manière imprévisible les captages d'eau

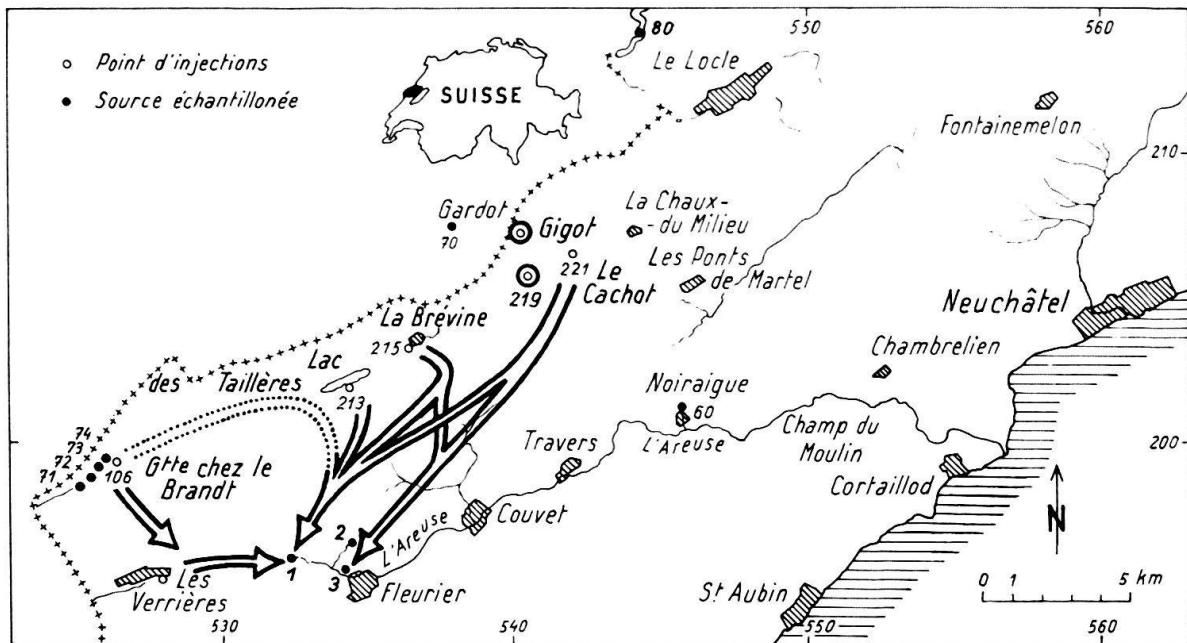


Fig. 8. Résultat du multitraçage du 4<sup>e</sup> SUWT.

1 = source de l'Areuse. 3 = source du Pont-de-la-Roche. Les traceurs injectés au Gigot et dans la perte du Petit Cachot (219) n'ont pas été détectés (d'après MÜLLER & ZÖTL 1980).

potable. Des liaisons à longue distance et dans des conditions difficiles ont déjà été réalisées dans le karst jurassien (ARAGNO & MÜLLER 1981).

### 2.5 *L'exploration géophysique*

La localisation des zones fracturées perméables est importante non seulement pour l'implantation d'ouvrages de captage, mais également pour la protection des réserves exploitables. La prospection géophysique, entreprise à l'aide de la microsismique et de la géoélectrique (tripotentiel), est basée sur la détection des anomalies géophysiques qui sont la conséquence des zones fracturées dans le karst. Les tests, exécutés sur des sites reconnus par les investigations géologiques et spéléologiques, donnent généralement de bons résultats, à condition toutefois que la ligne d'émission des dispositifs de mesure soit adaptée à l'anomalie recherchée (MÜLLER 1980).

### 3. Conclusions

Les méthodes d'investigations indirectes à l'aide de traceurs naturels et artificiels ainsi qu'au moyen d'approches géophysique, mises en valeur dans le cadre du Projet National, constituent des outils de travail précieux dans l'exploration des propriétés hydrogéologiques des aquifères calcaires. Ces recherches, effectuées dans un but essentiellement pratique, visent à élaborer des moyens d'approche simples et facilement réalisables pour tous les techniciens de l'eau, afin d'atteindre les objectifs fondamentaux du Projet National: la mise en valeur, l'exploitation, la gestion et la protection des nappes karstiques.

## Remerciements

Les auteurs remercient MM. les Prof. A. Burger, H. Oeschger et M. Dr L. Kiraly pour leurs conseils scientifiques et discussions critiques. Ils expriment leur reconnaissance à M<sup>me</sup> R. Wiedmer-Bühler, M. J. Rincon et M. K. Hänni pour les travaux de laboratoire, à M<sup>me</sup> F. Mauroux pour la dactylographie du manuscrit, et à M. G. Papaux pour la préparation des dessins.

Ce projet de recherche sur l'hydrogéologie du karst jurassien fait partie du Programme National sur le Cycle de l'Eau, financé par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique. Que cette institution trouve ici toute la gratitude des auteurs.

## BIBLIOGRAPHIE

- ARAGNO, M., & MÜLLER, I. (1981): *Premières expériences de traçage des eaux souterraines dans le karst neuchâtelois (Suisse) à l'aide de bactériophages.* - Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchâtel (sous presse).
- BURGER, A. (1956): *Interprétation mathématique de la courbe de décroissance du débit de l'Areuse.* - Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 79, 49-54.
- FORKASIEWICZ, J., & PALOC, H. (1967): *Le régime de tarissement de la Foux de la Vis.* - Chron. Hydrogéol. 10, 59-73.
- HAESLER, P. L. (1981): *Quelques considérations sur les courbes de décrue et de tarissement de la source de l'Areuse.* - Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 4 (sous presse).
- KIRALY, L., & MOREL, G. (1976): *Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulé par modèle mathématique.* - Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 1, 37-60.
- KIRALY, L., & MÜLLER, I. (1979): *Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst: effet sur la variation du chimisme des sources karstiques.* - Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 3, 237-285.
- MANGIN, A. (1975): *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques.* - Thèse Univ. Dijon.
- MÜLLER, I. (1980): *La localisation des zones fracturées dans le karst par la prospection géoélectrique et microsismique.* - Eclogae geol. Helv. 73, 855-866.
- MÜLLER, I., KIRALY, L., SCHOTTERER, U., & SIEGENTHALER, U. (1980): *Untersuchung des Neuenburger Jura.* In: MÜLLER, I., & ZÖTL, J.G. (Ed.): *Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz).* - Steir. Beitr. Hydrogeol. 32, 5-100.
- MÜLLER, I., & ZÖTL, J.G. (1980): *Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz).* - Steir. Beitr. Hydrogeol. 32, 5-100.
- SCHOELLER, H. (1967): *Hydrodynamique dans le karst (écoulement et emmagasinement).* - Chron. Hydrogéol. 10, 7-21.
- SCHOTTERER, U., & MÜLLER, I. (1981): *Estimation of groundwater reserves of a karstic aquifer (Areuse Spring, Jura of Neuchâtel, Switzerland).* - Bull. Cent. Hydrogéol. Univ. Neuchâtel 4 (sous presse).
- SIEGENTHALER, U., & SCHOTTERER, U. (1978): *Hydrologische Anwendungen von Isotopenmessungen in der Schweiz.* - GWF-Wasser/Abwasser 57/7, 501-506.
- TRIPET, J.P. (1972): *Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois).* - Thèse Univ. Neuchâtel.

