

Recherche d'eau par forage en rocher calcaire : exemple des forages implantés dans la Grande Oolithe (Dogger) à Delémont-Bellerive (JU)

Autor(en): **Flury, François / Wexsteen, Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Actes de la Société jurassienne d'émulation**

Band (Jahr): **92 (1989)**

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-555171>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Recherche d'eau par forage en rocher calcaire

Exemple des forages implantés dans la Grande Oolithe (Dogger)
à Delémont-Bellerive (JU)

par François Flury¹ et Pierre Wexsteen²

RÉSUMÉ

Une campagne de trois forages dans les calcaires de la Grande Oolithe (Dogger) de la cluse du Vorbourg au N de Delémont a donné les résultats suivants:

— deux forages (50 et 43 mètres de profondeur) improductifs au contact Grande Oolithe supérieure - Marnes à Acuminata;

— un forage (102 mètres) positif dans la Grande Oolithe inférieure: ce forage donne jusqu'à 18 m³/heure d'une eau de bonne qualité chimique, malgré un léger excès d'ammonium (0,05 mg/l NH₄⁺); elle est légèrement contaminée du point de vue bactériologique.

Un pompage d'essai d'un mois dans la Grande Oolithe inférieure a permis de calculer une transmissivité de 1,0 à 1,3 × 10⁻³ m²/s (perméabilité moyenne: 1,5 × 10⁻⁵ m/s); un graphe semi-logarithmique des données de cet essai montre deux segments de droite à pentes logarithmiques très différentes. Ce phénomène peut s'expliquer de deux manières:

— limite d'alimentation (relation hydraulique entre l'aquifère et la Birse);
— phénomènes transitoires de pertes de charges à l'interface forage - aquifère (postproduction).

La pente logarithmique non-nulle du deuxième segment de droite en graphe semi-logarithmique d'une part, les résultats de l'étude géochimique de l'eau du forage S3 comparativement à celle de la Birse d'autre part, permettent d'exclure une relation directe entre la Birse et l'aquifère de la Grande Oolithe inférieure.

ABSTRACT

Drilling in the karstic limestones of the Grande Oolithe (Dogger) of the Jura mountains north of Delémont (NW Switzerland) produced the following result:

— 2 wells (50 and 43 metres deep) were dry in the Upper Grande Oolithe;

— a 100 metre deep well in the Lower Grande Oolithe produced up to 18 m³/hour of water; the water showed low bacteriological contamination. The water chemistry meets the potability requirements, with the exception of ammonium (0.05 mg/l NH₄⁺).

Transmissivity calculations were performed on the basis of data collected during the one month discharge test. Transmissivity was found to be between 1.0 and 1.3×10^{-3} m²/s (average permeability: 1.5×10^{-5} m/s). A semi-log data plot of the discharge test shows two linear trends of very different gradient. Two hypotheses were put forward to explain this phenomenon:

— positive boundary conditions (hydraulic connection between the Lower Grande Oolithe aquifer and the neighbouring River Birse);
— transient headloss between the well and the aquifer (skin effect, wellbore storage).

The non-zero slope of the second trend and comparison of the chemistry of groundwaters with that of waters from the River Birse indicates that there is no direct hydraulic connection between the two waters.

1. INTRODUCTION

Entre 1967 et 1988, alors que la population de la ville de Delémont stagnait, les ventes d'eau augmentaient de 33% (valeurs selon régression linéaire 1967-1988).

Les sources et puits qui alimentent actuellement Delémont fournissent un débit minimum garanti de 4000 l/min. Cette ressource d'étiage est insuffisante: lorsque le débit total des points d'eau tend vers le minimum, les besoins ne sont plus couverts. A chaque été-automne un peu sec, il faut, par des moyens de fortune (arrosage des champs aux Rondez), assurer l'alimentation en eau de la ville.

Vu l'augmentation constante des besoins, la durée et la fréquence des périodes déficitaires ne fera qu'augmenter à l'avenir.

La Ville de Delémont a donc décidé d'entreprendre des recherches en eau, et a mandaté le bureau MEURY & FLURY pour la réalisation de ces recherches. Celles-ci s'articulent en trois volets:

1. à court terme: exploration de l'aquifère du Dogger à Bellerive;
2. à court terme: réactualisation des études au puits «Lévy» sous le Vorbourg, en rive gauche de la Birse;
3. à moyen terme: exploration de l'aquifère du Malm au SW de la ville par forages à 450 mètres de profondeur.

Les résultats quantitatifs et qualitatifs de la campagne de forages d'eau dans les calcaires du Dogger (Grande Oolithe) au SW de Bellerive font l'objet de la présente communication.

Nous désirons présenter, dans un contexte de recherche d'eau en aquifère karstique:

1. le rôle de l'Hydrogéologue praticien: implantation des ouvrages (hydrogéologie et géophysique), organisation et suivi du chantier, organisation des pompages d'essais, des prélèvements et analyses d'eau, interprétation des données et synthèse.

2. le rôle de l'Hydrogéochimiste: mise en évidence de l'évolution géochimique de l'eau et de son origine. Résultats utilisés pour la synthèse.

2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

Le site retenu pour les forages comprend la partie aval de la petite forêt en rive gauche du canal au NW de l'écluse de Bellerive (Fig. 1).

Il a été proposé pour la première fois par trois étudiants de l'Université de Neuchâtel [FLURY, HENNET & MATHYS, 1981].

Les trois forages ont été implantés au S de l'ancienne carrière (photo N° 1), au droit de l'ancienne source et des principales venues d'eau observées en crue (photo N° 2).

Ce site appartient au flanc S de l'anticlinal du Vorbourg, de direction E-W. A cet endroit, les structures anticlinales profondes sont mises à jour par la cluse du Vorbourg d'axe N-S; les couches redressées à 80° vers le S de la Grande Oolithe affleurent. Elles comprennent de haut en bas (Fig. 2c):

- 30 mètres de calcaires aquifères de la Grande Oolithe supérieure;
- 10 mètres de marnes des Couches à Acuminata;
- 80 mètres de calcaires aquifères de la Grande Oolithe inférieure.

3. INVESTIGATIONS

Les investigations se sont déroulées en trois phases:

1. implantation des forages d'eau (détermination du lieu où l'on procédera aux forages);
2. exécution des forages;
3. exécution des pompages d'essais (détermination des quantités et qualités d'eau découverte).

3.1 *Implantation des forages*

Le choix du lieu se fait par examen des conditions hydrogéologiques régionales et locales puis, plus précisément, par méthode géophysique.

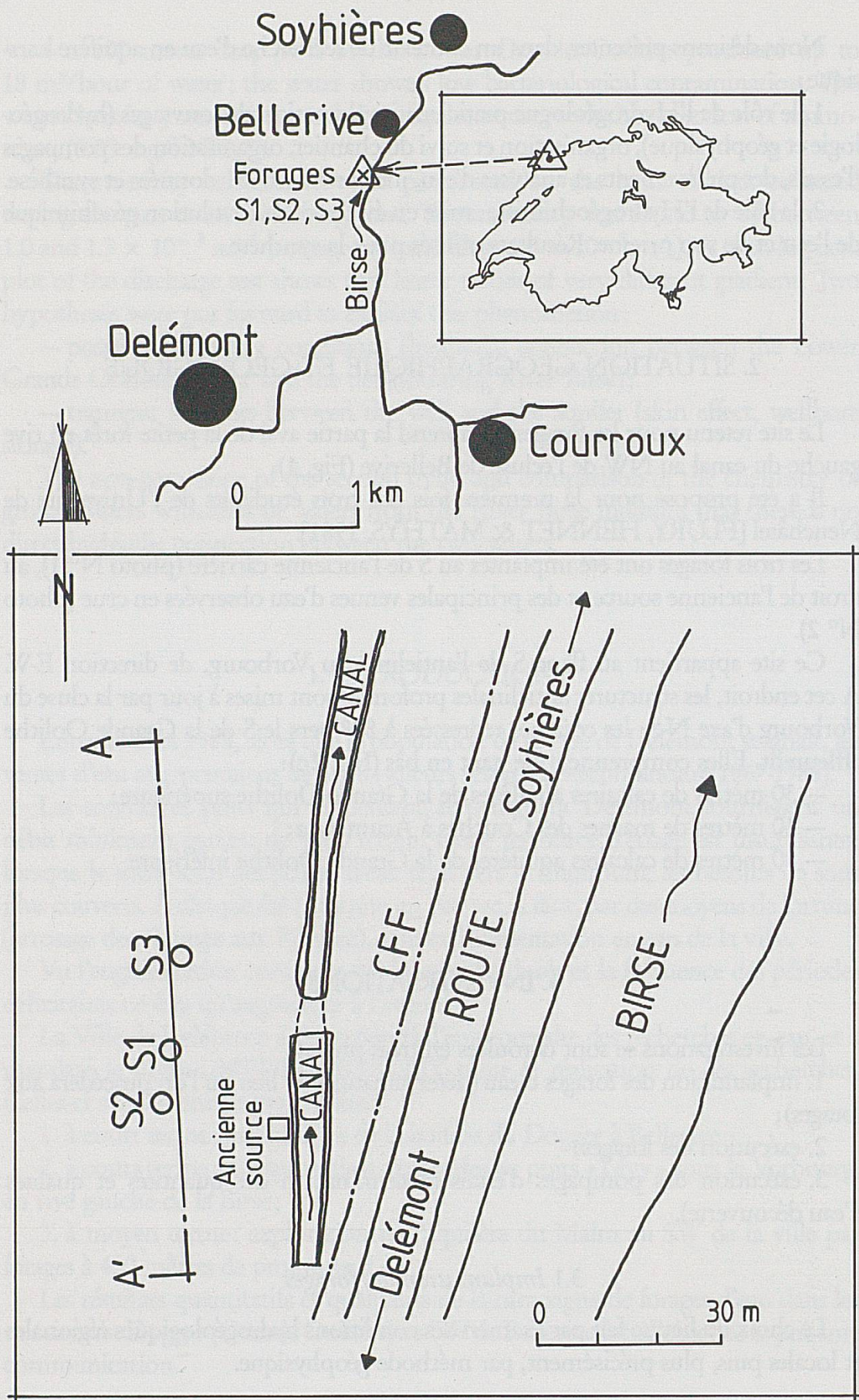


Figure 1 - Situation des forages S1, S2 et S3; (A - A' : trace du profil géologique de la figure 2c).

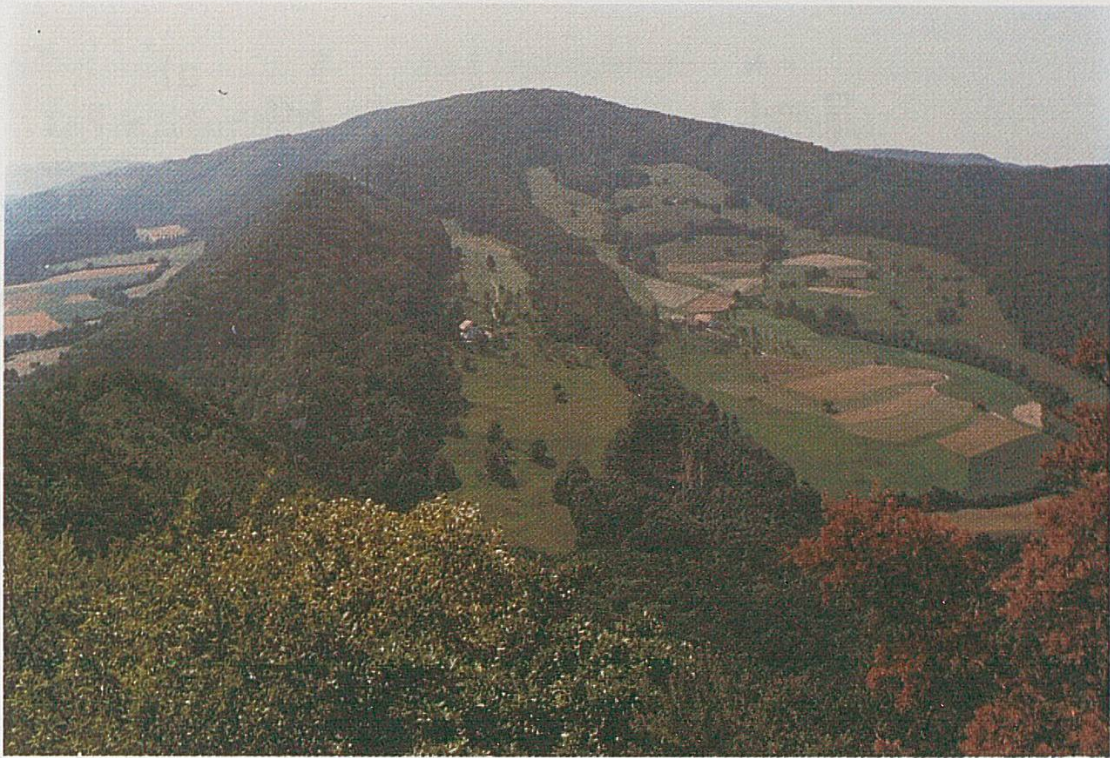


Photo 1 - Flanc sud de l'anticlinal du Vorbourg; photo prise du Roc de Courroux en direction de l'W; on distingue au S (à gauche) la ferme du Premier Vorbourg et, au N (à droite), la ferme du Deuxième Vorbourg. La petite bande de forêt comprise entre les deux fermes correspond aux calcaires de la Grande Oolithe exploitée autrefois dans la carrière de Belle-rive (dans l'ombre au centre de la photo). Les forages se situent dans la forêt au S (à gauche) de l'ancienne carrière.



Photo 2 - Venues d'eau en rive gauche (W) du canal de Bellerive lors de la crue du 28 mars 1988.

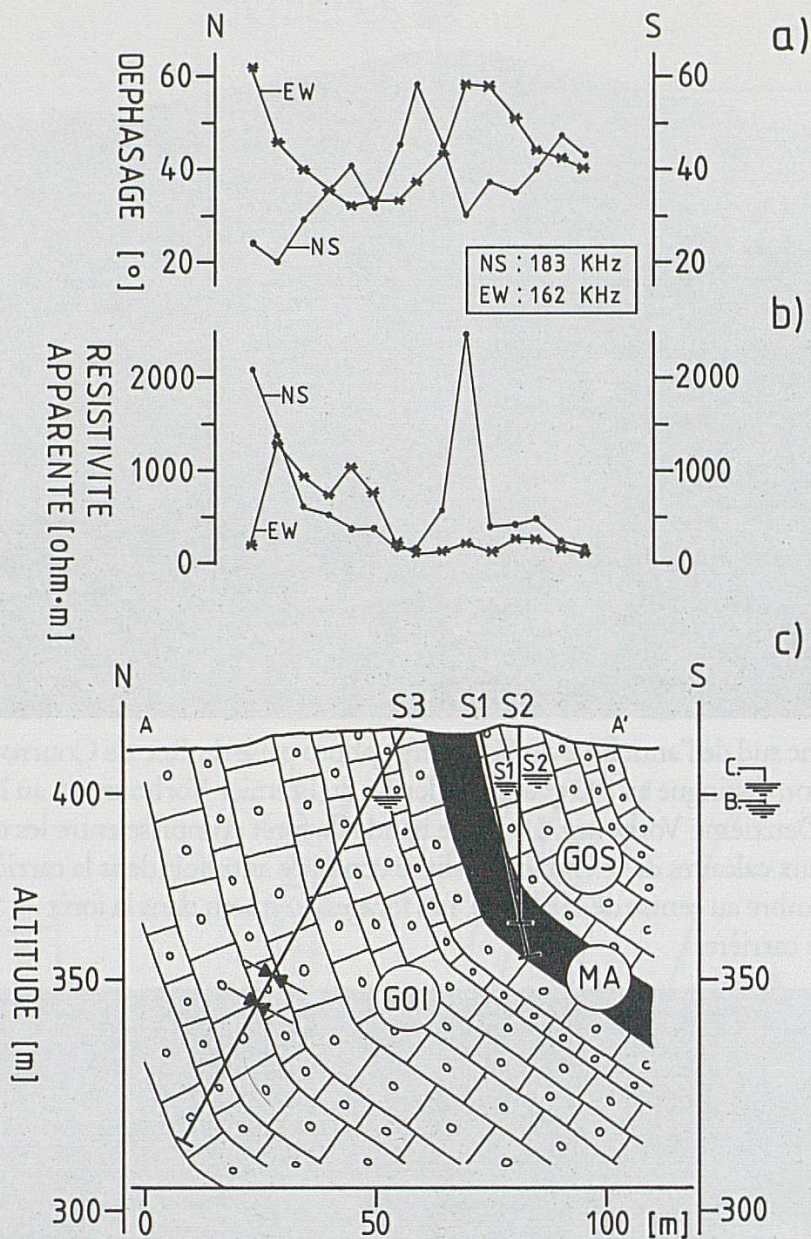


Figure 2- Profils géophysique et géologique au droit des forages S1, S2 et S3

- a) décalage de phases entre les champs électriques et magnétiques selon les directions N-S et E-W;
- b) résistivités apparentes selon les directions N-S et E-W;
- c) profil géologique selon les données de 3 forages; GOI: Grande Oolithe inférieure; MA: Marnes à Acuminata; GOS: Grande Oolithe supérieure; C.: niveau d'eau approximatif dans le canal de Bellerive au droit des forages; B.: niveau d'eau approximatif dans la Birse au droit des forages.

3.1.1 Hydrogéologie

Le S de la carrière de Bellerive présente les avantages suivants:

- il s'agit du seul exutoire possible des eaux souterraines du Dogger sur le flanc S de l'anticlinal du Vorbourg dans un rayon de plusieurs kilomètres;
- lors de fortes pluies, une source temporaire («ancien captage») ainsi que de nombreuses venues d'eau en rive gauche du canal de Bellerive débitent jusqu'à 2-4 m³/min (voir la photo N° 2 de la crue du 28 mars 1988);
- le bassin de cette zone d'exutoire est en majeure partie boisé, ce qui limite la vulnérabilité de l'aquifère;
- une analyse chimique des eaux de la source temporaire le 8 avril 1987 indiquait une eau de bonne qualité chimique (absence de turbidité notamment) et faiblement contaminée du point de vue bactériologique (0 Coliforme, 4 Esch. coli et 1 Entérocoque dans 100 ml d'eau).

En résumé, le site choisi possédait *a priori* les avantages suivants:

1. zone d'exutoire potentielle d'un bassin d'alimentation de plusieurs kilomètres carrés de calcaires aquifères;
2. karstification prouvée par de fortes venues d'eau en période de crue;
3. bonne couverture végétale et faible peuplement du bassin d'alimentation laissant augurer une bonne qualité de l'eau.

3.1.2 Géophysique

Une fois le site défini selon les critères hydrogéologiques décrits ci-dessus, l'implantation précise s'est faite par méthode géophysique de type électromagnétique VLF. Cette méthode utilise les propriétés des ondes électromagnétiques de basses et très basses fréquences pour mesurer la résistivité apparente du sous-sol à diverses profondeurs d'investigations. Le déphasage entre l'onde électrique et l'onde magnétique procure une information sur la succession stratigraphique et l'anisotropie du sous-sol. Des mesures pluri-directionnelles permettent de déceler les zones karstifiées à petite échelle (quelques mètres) [MULLER, 1984], [WEXSTEEN & MULLER, 1987].

Les résultats du profil I, aligné sur les trois forages, sont présentés à la figure 2a et 2b; on remarque deux anomalies intéressantes: l'une correspond aux Marnes à Acuminata, ou à la zone de contact de ces marnes avec la base de la Grande Oolithe supérieure. L'autre anomalie, à l'extrémité N du profil de mesures pourrait correspondre aux venues d'eau découvertes au forage S3 (cf. ci-dessous, chap 3.2.2).

(Le détail des mesures complètes de la campagne VLF est donné dans le rapport Meury & Flury du 11 novembre 1988).

Nous avons donc décidé:

1. dans un premier temps, de forer à la base de la Grande Oolithe inf., au contact marnes-calcaires, de manière à recouper en profondeur le ou les griffons de

l'ancienne source ou une zone karstifiée correspondante; le premier forage était prévu avec une inclinaison de 15 degrés vers le S, afin de suivre la direction des écoulements présumés;

2. dans une seconde phase, de reprendre l'implantation à la lumière des résultats de la première phase.

3.2 Exécution des forages

3.2.1 Forages S1 et S2 (*Grande Oolithe supérieure*)

Les forages ont été prévus en mode destructif, afin de pouvoir forer en diamètre plus grand à un prix inférieur aux forages carottés. En cas de découverte d'eau, on peut ainsi pomper des débits plus importants. Ce choix a été dicté par le souci premier d'un approvisionnement accru en eau.

Après un essai infructueux au tricône (avancement trop lent: env. 3 m/jour), nous avons conseillé à l'entreprise de forer au marteau fond-de-trou, ce qui a permis de faire passer l'avancement à 6-8 m/heure.

Tous les trous ont été forés en diamètre 200 mm, les déblais de roche étant remontés à la surface par la technique de l'air-lift.

Les forages ont été équipés avec des tubes PVC, de diamètres intérieurs 150 mm, crépinés en S1 de - 50 à - 10 mètres, et de - 43 à - 10 mètres en S2, la partie supérieure étant aveugle dans chacun des deux ouvrages.

Ce tubage est exigé par l'entreprise pour des raisons de protection de la pompe immergée: il a le désavantage d'induire des pertes de charges lors des pompages, ce qui diminue le débit spécifique du forage.

Le premier forage S1, incliné à 12° vers le S, a débuté le 11 juillet 1988. Il a été arrêté à une profondeur de 50 mètres (profondeur verticale: 49 m) le 19 juillet.

Le levé géologique des formations traversées s'est fait sur la base des déblais de roche:

0 m à 3 m: éboulis de pente

3 m à 19 m: calcaires oolithiques brun clair ou gris-bleu selon l'état d'oxydation

19 m à 50 m: alternance de niveaux de calcaires marneux et de marnes indurées, le tout gris-bleu.

Le deuxième forage a été exécuté du 20 au 21 juillet 1988 directement à la suite du S1 à env. 10 mètres au S. Il a été foré verticalement à quelques mètres à l'aval de l'ancienne source dans le but de trouver le toit des Marnes à *Acuminata* plus bas qu'en S1, et de recouper en profondeur le ou les griffons de l'ancienne source.

Ce forage a été poussé jusqu'à une profondeur de 43 mètres.

Le levé des déblais du forage S2 a permis d'établir la coupe suivante:

0 m à 3 m: éboulis de pente

3 m à 35 m: calcaires oolithiques gris-bleu à brun clair selon l'état d'oxydation

35 m à 43 m: calcaires marneux et marnes indurées gris-bleu.

En fin de forage, les niveaux piézométriques étaient stabilisés à 11,8 m sous tubage en S1 et 10,8 m en S2 (cotes des tubages approximativement au niveau du sol; voir Fig. 2c).

Après équipement, une pompe immergée a été installée dans chacun des deux forages S1 et S2. Un pompage d'essai a été organisé le 27 juillet 1988:

— dans le forage S1, le niveau piézométrique est passé de 11,8 m (repos) à 37 m en 8 minutes avec un débit d'env. 100 l/min; il a fallu arrêter la pompe en urgence pour ne pas la dénoyer;

— forage S2: le niveau piézométrique est passé de 10,8 m (repos) à 36,3 m en pompant env. 60 l/min pendant 9 minutes; ici aussi, la pompe fut arrêtée en urgence.

En conclusion, ces deux forages sont à considérer comme non-productifs: on ne peut espérer en tirer plus de quelques dizaines de l/min en régime d'exploitation.

3.2.2 Forage S3 (*Grande Oolithe inférieure*)

Au vu de l'échec des deux premiers forages, il a été décidé d'explorer les calcaires de la Grande Oolithe inférieure, sous les Marnes à *Acuminata*, au N des forages S1 et S2.

Nous avons implanté le 3^e forage selon les critères suivants:

— les forages S1 et S2 ont démontré la faible épaisseur utile de la Grande Oolithe supérieure (toit des Marnes à *Acuminata* trop haut);

— la Grande Oolithe inférieure se développe sur plusieurs dizaines de mètres en zone saturée en eau: elle constitue donc un important réservoir;

— le forage doit être incliné au maximum des possibilités de la foreuse vers le N, afin de recouper un maximum de conduits karstiques qui, selon toute vraisemblance, se sont développés selon les plans de stratification inclinés à env. 80° vers le S;

— le forage doit recouper un maximum de venues d'eau observées en crue au bord du canal (photo N° 2).

Le forage S3, incliné à 28° vers le N, a débuté le 9 août 1988, et a été arrêté à 103 m de profondeur le 15 août (profondeur verticale: 90 m). L'avancement moyen, par jour ouvrable, est de 20 à 25 m.

Ce forage a recoupé les terrains suivants:

0 m à 5 m: éboulis de pente

5 m à 60 m: calcaires oolithiques brun clair à gris-bleu selon l'état d'oxydation

60 m à 95 m: idem mais avec fragments de calcite

95 m à 102 m: comme de 5 m à 60 m.

Le 11 août, le forage a recoupé des fractures ou karst aquifères à 60 m de profondeur, puis à 67-68 m (profondeurs verticales: respectivement 53 m et 59,5 m). Sous l'effet de l'air-lift, une eau brun ocre est ressortie du trou de forage. Le débit dû à l'air-lift avoisinait les 200-300 l/min. Aucune autre fracture n'a été recoupée entre 70 et 100 m.

D'un point de vue géophysique, ces venues d'eau se situent à la verticale de l'anomalie N du profil I (Fig. 2c), mais à une altitude à la limite de la profondeur d'investigation de la méthode VLF utilisée.

Le forage S3 a ensuite été équipé avec un tube PVC, de diamètre intérieur 150 mm, crépiné de - 98,4 à - 24,4 mètres, la partie supérieure étant aveugle. Le sommet du tubage se situait à environ 30 cm au-dessus du sol.

3.3 Pompages d'essais

Les pompages d'essais ont trois buts:

a) tester les caractéristiques de l'ouvrage de captage, c'est-à-dire l'hydraulique du forage lui-même. Il s'agit de l'*essai de puits*, que l'on effectue par paliers de débit; il permet de déterminer le débit maximum que l'on peut tirer de l'ouvrage [CASTANY, 1982];

b) déterminer les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère que le puits recoupe (transmissivité et perméabilité, éventuellement coefficient d'emmagasinement). Il s'agit du *pompage d'essai* à proprement parler, appelé aussi essai de nappe; le pompage d'essai, de longue durée généralement, détermine le débit que peut fournir l'aquifère en régime d'exploitation (pompage continu sur plusieurs semaines ou mois) [KRUSEMANN & DE RIDDER, 1974];

c) déterminer la qualité de l'eau découverte et, éventuellement, son origine et son évolution par analyses chimiques et bactériologiques.

Les essais dans le forage S3 se sont déroulés du 16 août au 27 septembre 1988 avec une interruption de 2 jours (24-26 août 1988) pour redescendre la pompe.

Au total, 17048 m³ ont été pompés sur cette période de 43 jours, ce qui représente un débit moyen de 275 l/min (4,6 l/s ou 16,5 m³/h).

3.3.1 Essai de puits en S3

Il s'agit d'un essai par paliers à débit constant. On mesure deux données: le débit constant et le rabattement stabilisé après une certaine durée de pompage (rabattement: différence de hauteur d'eau dans le forage entre le repos et le pompage). Il permet d'établir la *courbe caractéristique* de l'ouvrage, courbe qui donne l'évolution du rabattement en fonction du débit pompé. La courbe caractéristique permet une appréciation du type de pertes de charge (linéaires, quadratiques ou exponentielles) entre l'aquifère et l'ouvrage de captage.

Notre essai de puits a comporté 4 paliers: 177, 258, 274 et 304 l/min, le dernier palier étant déduit du pompage d'essai de longue durée. Cet essai de longue durée a montré qu'en fait, le rabattement n'est jamais vraiment stabilisé (cf. chap. 3.3.2): les paliers utilisés ci-dessous permettent néanmoins une excellente approche de la courbe caractéristique de l'ouvrage S3.

Cette courbe caractéristique est donnée à la figure 3. Le rabattement mesuré dans le forage y est multiplié par un facteur $\cos 28^\circ$, pour tenir compte de l'inclinaison à 28° du forage.

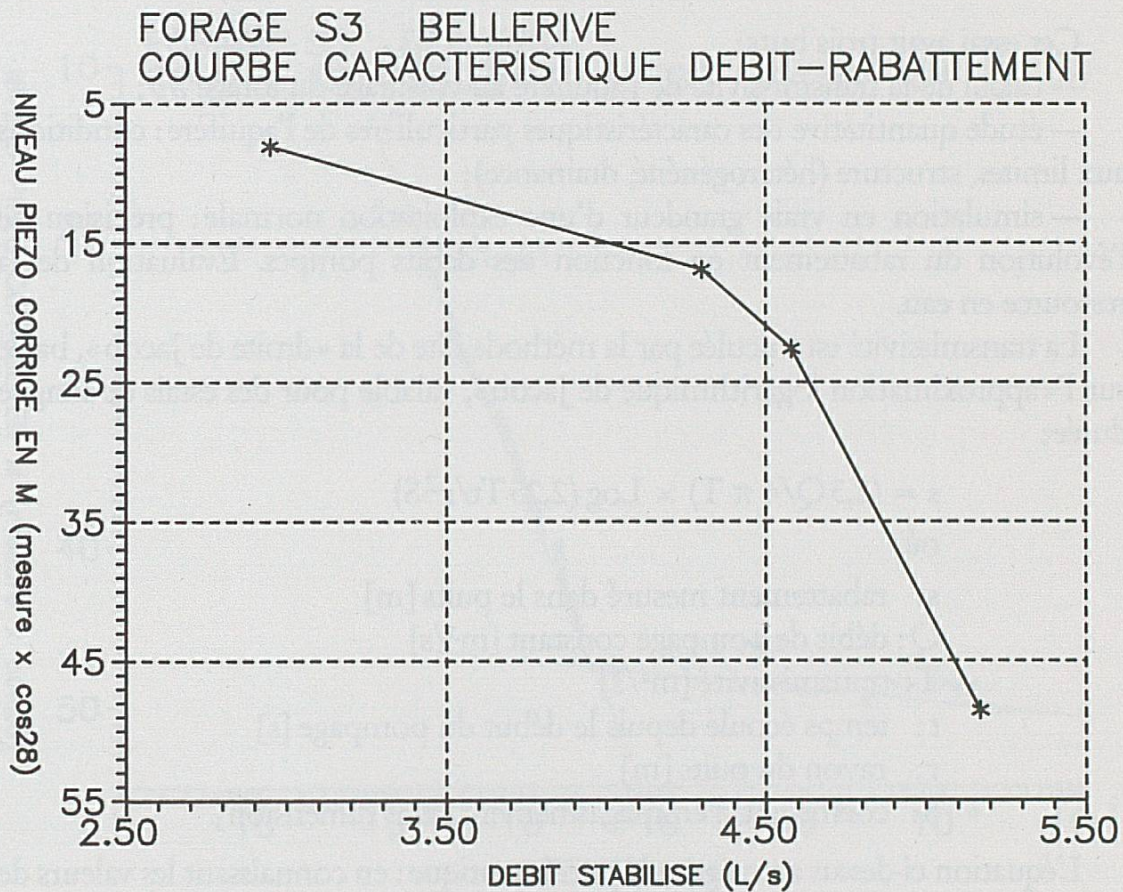


Figure 3 - Courbe caractéristique débit-rabattement du forage S3.

Les pertes de charge augmentent environ avec le cube du débit, selon une loi d'équation:

$$S = 0,29 \times Q^{2,93} \quad r = 0,94$$

avec: S niveau piézo [m]

Q débit [l/s]

r coefficient de corrélation.

En aquifère à porosité d'interstices, type graviers, la loi des pertes de charge est *a priori* de type quadratique [CASTANY, 1982]. On peut voir dans la courbe caractéristique cubique de S3 une indication de pertes de charges «excessives», attestant du caractère karstique de l'aquifère.

Les niveaux aquifères étant situés en dessous de 53 mètres (profondeur verticale), on évitera de les dénoyer en régime d'exploitation, pour ne pas voir le débit chuter complètement. On constate donc, en extrapolant la courbe caractéristique vers le bas, que **le débit maximum de cet ouvrage ne peut excéder 5,2 l/s**, c'est-à-dire 310 l/min.

3.3.2 Pompage d'essai de longue durée

Cet essai avait trois buts:

- calcul de la transmissivité de l'aquifère au voisinage du forage S3;
- étude quantitative des caractéristiques particulières de l'aquifère: conditions aux limites, structure (hétérogénéité, drainance);
- simulation en vraie grandeur d'une exploitation normale: prévision de l'évolution du rabattement en fonction des débits pompés. Evaluation de la ressource en eau.

La transmissivité est calculée par la méthode dite de la «droite de Jacob», basée sur l'«approximation logarithmique de Jacob», valable pour des essais de longue durée:

$$s = (2,3Q/4 \pi T) \times \text{Log} (2,25 Tt/r^2 S)$$

où:

s: rabattement mesuré dans le puits [m]

Q: débit de pompage constant [m³/s]

T: transmissivité [m²/s]

t: temps écoulé depuis le début du pompage [s]

r: rayon du puits [m]

S: coefficient d'emmagasinement [sans dimension].

L'équation ci-dessus a une grande portée pratique: en connaissant les valeurs de T et S, on peut calculer, pour un débit donné, l'évolution du rabattement dans le temps. Ceci permet de tester différents types (Q-t) d'exploitation.

Le coefficient d'emmagasinement n'est obtenu que si l'on dispose d'un piézomètre suffisamment éloigné du puits de pompage, ce qui n'est pas le cas ici. On admettra, selon BURGER (1983), un coefficient d'emmagasinement compris entre 2/1000 et 4/1000.

L'essai a duré du 26 août au 27 septembre 1988; le débit moyen de l'essai était de 304 l/min (débits mesurés entre 290 et 318 l/min). Les données obtenues en S3 permettent de tracer la droite moyenne représentative de Jacob (voir Fig. 4).

La transmissivité est calculée par la «pente logarithmique» de la droite représentative, pente déterminée par l'accroissement des rabattements au cours d'un module logarithmique, notée C. La transmissivité est donnée par l'expression:

$$T = 0,183 Q/C$$

L'examen de la courbe de descente (Fig. 4) donne les résultats suivants: à une première droite de pente logarithmique $C1 = 21$ succède, après 40 minutes de pompage environ, une deuxième droite de pente $C2 = 0,9$: nous avons donc une courbe de descente à 2 segments de droite:

— le premier segment, de pente $C1 = 21$ correspond à une transmissivité $T1 = 4,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;

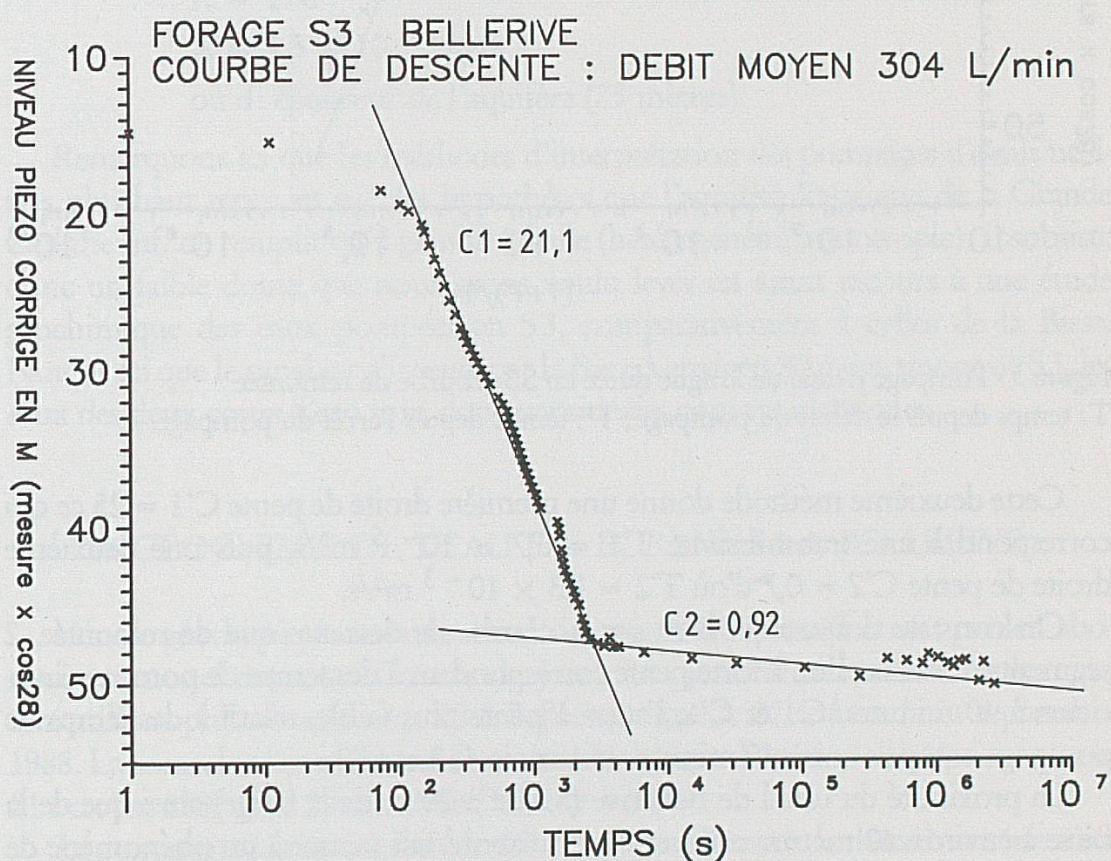


Figure 4 - Pompage d'essai de longue durée en S3: courbe de descente.

— le deuxième segment, de pente $C2 = 0,9$ correspond à une transmissivité $T2 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Une autre méthode de calcul de la transmissivité, similaire à celle décrite ci-dessus, est celle dite de la « courbe de remontée ». La représentation graphique des mesures de remontée est donnée à la Fig. 5.

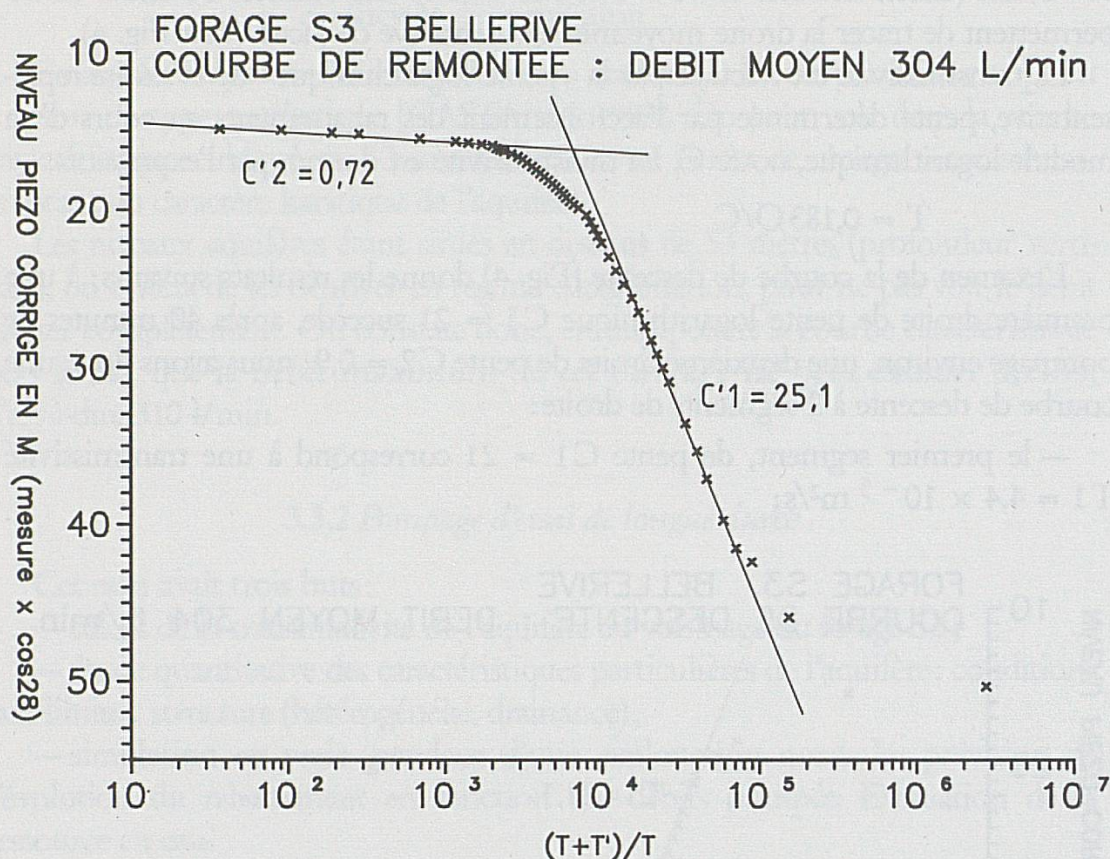


Figure 5 - Pompage d'essai de longue durée en S3 : courbe de remontée
 T : temps depuis le début du pompage ; T' : temps depuis l'arrêt du pompage.

Cette deuxième méthode donne une première droite de pente $C'1 = 25$ ce qui correspond à une transmissivité $T'1 = 3,7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, puis une deuxième droite de pente $C'2 = 0,7$ d'où $T'2 = 1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

On constate donc, aussi bien sur la courbe de descente que de remontée, 2 segments de droite, l'un à forte pente correspondant à des temps de pompage inférieurs à 40 minutes, $C1$ et $C'1$, l'autre à pente plus faible, relatif à des temps de pompage compris entre 40 minutes et 1 mois, $C2$ et $C'2$.

La proximité du canal de Bellerive (S3 est à 20 m de la berge) ainsi que de la Birse à environ 40 mètres, nous ont tout d'abord fait penser à un phénomène de *limite d'alimentation*. L'eau pompée en S3 serait en relation hydraulique avec celle du canal et/ou de la Birse.

Toutefois, un tel phénomène de *système avec limite rectiligne d'alimentation* [DE MARSILY, 1981, p. 135-6] impliquerait une stabilisation du rabattement avec le temps. Or, sur un mois de pompage, l'accroissement du rabattement reste sensible et, surtout, constant (Fig. 4, droite moyenne de pente $C2 = 0,9$).

Une autre explication des courbes semi-logarithmiques à 2 segments de droite que nous trouvons lors du pompage d'essai en S3 est donnée par TRIPET (1984). Cet auteur, en étudiant les données des essais conduits dans les forages du bassin de Laufon, a mis en évidence un effet de pertes de charge dans les ouvrages appelé *effet de puits* (skin effect): le 1^{er} segment de pente $C1$ de la courbe de descente correspond à des phénomènes transitoires de pertes de charges à l'interface forage-aquifère: la transmissivité doit donc être calculée selon la pente du 2^e segment de droite: $C2 = 0,9$ d'où $T = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Les mêmes considérations s'appliquent à la courbe de remontée (effet de *post-production*): $C'2 = 0,7$ d'où $T' = 1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

On retiendra donc, pour la **transmissivité de l'aquifère**:

$$T = 1,0 \text{ à } 1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

ce qui correspond à un coefficient moyen de perméabilité:

$$K = T/d$$

$$K = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

où d : épaisseur de l'aquifère (75 mètres)

Remarquons ici que les méthodes d'interprétation des pompages d'essais utilisées plus haut reposent sur des hypothèses que l'aquifère karstique de la Grande Oolithe inf. ne remplit qu'à grande échelle (hétérogénéité, anisotropie): il subsiste donc un faible doute que nous avons voulu lever en ayant recours à une étude géochimique des eaux pompées en S3, comparativement à celles de la Birse. Notons ici que le canal est alimenté par la Birse à environ 80 m en amont de S3, les eaux des deux cours d'eau sont donc considérées comme identiques.

4. GÉOCHIMIE DE L'EAU DU FORAGE S3 A BELLERIVE

L'étude géochimique est basée sur deux séries d'analyses effectuées par le Laboratoire cantonal des eaux (Canton du Jura). La première série concerne les cinq échantillons prélevés au forage S3 à Bellerive, entre le 22 août et le 21 septembre 1988. La seconde série concerne l'eau de la Birse pour la période comprise entre le 21 octobre 1987 et le 3 août 1988 (Tableau 5.1).

La concentration en calcium de tous les échantillons de la deuxième série n'est pas connue, et seule la concentration en magnésium de l'échantillon 03.08.88 est connue.

Cette étude géochimique a pour buts:

1. caractériser les propriétés chimiques de l'eau considérée,
2. retracer l'évolution géochimique de cette eau,
3. vérifier un des résultats de l'étude hydraulique: y a-t-il une relation entre l'eau de la Birse et l'eau prélevée au forage S3?

4.1 *Caractères géochimiques de l'eau souterraine S3*

L'eau prélevée au forage S3 est une eau de type chimique calcique bicarbonaté (Ca-HCO_3), avec des concentrations en magnésium et sulfates relativement élevées. Celles-ci ne varient pratiquement pas au cours de la période de temps considérée. Sa minéralisation totale est caractérisée par une conductivité électrique moyenne de $424 \mu\text{S/cm}$. Celle-ci varie faiblement (2%) au cours de la période d'août à septembre 1988 (Tableau 5.1). Les caractéristiques chimiques des eaux prélevées durant cette période ne se différencient pas de celles des eaux du Dogger généralement rencontrées dans le Jura suisse [SCHMASSMANN et al., 1984].

4.2 *Origine de l'eau souterraine S3*

L'étude hydraulique montre qu'il est envisageable que l'eau souterraine prélevée au forage S3 soit originellement de l'eau de la Birse. On a donc voulu savoir si cette éventualité était compatible avec la géochimie des eaux analysées.

Pour cela, on s'est intéressé aux concentrations en magnésium, sulfates, sodium, nitrates, chlorures et en silice. En effet, d'une part les concentrations en bicarbonates varient peu entre les deux eaux considérées et d'autre part les concentrations en calcium ne sont pas connues pour les échantillons de la Birse.

Lorsque l'on compare les compositions chimiques des eaux prélevées durant le mois d'août 1988, on constate que l'eau souterraine S3 est enrichie principalement en sulfates et magnésium par rapport à l'eau de la Birse considérée (Fig. 6).

Ce qui signifie qu'on pourrait concevoir une eau de la Birse enrichie en magnésium et sulfates aux dépens des roches qu'elle aurait rencontrées après son infiltration et dont les concentrations en calcium et bicarbonates seraient similaires entre l'«input» et le prélèvement. Une telle évolution pourrait refléter par exemple un processus de dédolomitisation. Ce processus correspond chimiquement à une dissolution de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) accompagnée d'une précipitation de calcite (CaCO_3) arrivée à saturation qui résulte de la dissolution irréversible de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). En d'autres termes, il s'agit d'un gain de magnésium et de sulfates, et d'une conservation de l'équilibre entre l'eau et la calcite.

Cependant, la courte période de temps considérée et la faible distance entre le lit de la rivière et le forage S3 ne sont pas compatibles cinétiquement avec un tel mécanisme chimique. On ne peut donc pas retenir cette explication.

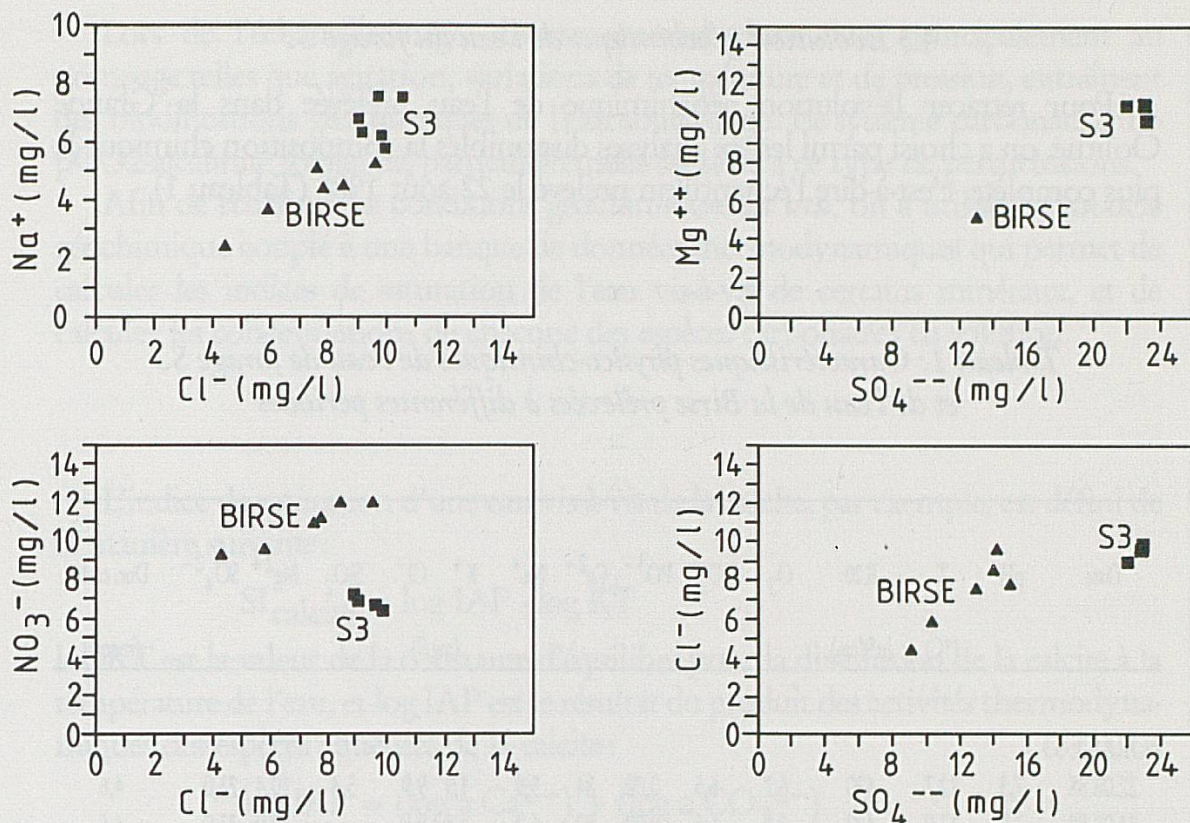


Figure 6 - Représentations graphiques des concentrations chimiques des eaux de la Birse et du forage S3.

On pourrait également concevoir que l'eau prélevée au forage S3 résulte d'un mélange entre l'eau de la Birse s'infiltrant dans les calcaires sous-jacents et une eau de type chimique différent circulant dans l'aquifère du Dogger (Grande Oolithe).

Les représentations graphiques de la figure 6 ne démentent pas totalement cette hypothèse. En effet, on conçoit bien un mélange entre l'eau de la Birse et une eau de l'aquifère dont les concentrations en magnésium et sulfates soient significativement plus importantes, dont les concentrations en sodium, chlorures et silice soient légèrement plus élevées du fait d'un aquifère carbonaté, et enfin dont la concentration en nitrates soit moins importante (Fig. 6). Toutefois, les teneurs en calcium et bicarbonates ne sont pas compatibles avec cette hypothèse.

On peut donc écarter l'éventualité d'une influence directe de l'eau de la Birse sur la chimie de l'eau prélevée au forage S3, et par conséquent d'une relation hydraulique avec la Birse. Par contre, il est plus probable que cette eau souterraine soit une eau de précipitation atmosphérique qui a évolué géochimiquement au contact des roches qu'elle a rencontrées lors de son parcours souterrain dans un système karstique noyé.

4.3 Evolution géochimique de l'eau du forage S3

Pour retracer l'évolution géochimique de l'eau prélevée dans la Grande Oolithe, on a choisi parmi les six analyses disponibles la composition chimique la plus complète, c'est-à-dire l'échantillon prélevé le 22 août 1988 (Tableau 1).

Tableau 1: Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de forage S3 et de l'eau de la Birse prélevées à différentes périodes

Date	pH	T (°C)	K20 (µS/cm)	O ₂	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SiO ₂	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Dur. carb. (meq/l)
											(mg/l)			
FORAGE S3														
22.08.88	7,3	12,7	420	6,7	6,5	0,02	84	5,9	1,9	9,9	5,4	10,4	23,0	4,6
24.08.88	7,5	12,9	422	6,7	6,5	0,02	82	6,2	1,8	9,8		11,0	23,0	4,6
07.09.88	7,3	13,1	420		6,7	0,02	79	7,6	2,7	9,7	4,3	11,0	23,0	4,4
14.09.88	7,6	13,2	425		6,9	0,03	80	6,4	2,1	9,1	3,7	11,0	22,0	4,6
21.09.88	7,7		429	6,8	7,2	0,06	86	6,8	2,4	9,0	5,9	11,0	22,0	4,6
BIRSE														
03.08.88	8,3	14,7	399	10,3	11,0	0,30		5,1	2,2	7,6	5,4	5,2	13,0	4,5
14.06.88	8,3	11,2	396	12,0	9,6	0,20		3,7	1,7	5,9	3,9		10,3	4,5
12.04.88	8,3	8,5	355	10,8	9,2	0,08		2,4	1,2	4,4	2,6		9,1	4,0
16.02.88	8,6	4,1	482	12,0	12,0	0,15		4,5	1,7	8,5	3,5		14,0	5,4
10.12.87	7,9	6,4	425	13,0	12,0	0,20		5,3	1,8	9,6	4,5		14,2	4,6
21.10.87	8,4	10,0	421	10,3	11,2	0,30		4,4	2,1	7,8	4,9		15,0	4,6

Lors de l'échantillonnage, diverses perturbations dues principalement au pompage telles que agitation, variations de température et de pression, entraînent des modifications géochimiques de l'eau souterraine. Le système carbonaté (pH-pCO₂-alcalinité totale) est particulièrement sensible à ce type de perturbations.

Afin de redéfinir les conditions géochimiques *in situ*, on a utilisé un modèle géochimique couplé à une banque de données thermodynamiques qui permet de calculer les indices de saturation de l'eau vis-à-vis de certains minéraux, et de calculer les concentrations de chacune des espèces carbonatées en solution.

L'indice de saturation d'une eau vis-à-vis de la calcite, par exemple, est défini de la manière suivante :

$$SI_{\text{calcite}} = \log \text{IAP} - \log \text{KT}$$

log KT est la valeur de la constante d'équilibre pour la dissolution de la calcite à la température de l'eau, et log IAP est le résultat du produit des activités thermodynamiques des espèces aqueuses de la calcite :

$$\log \text{IAP} = (\log a \text{Ca}^{2+}) + (\log a \text{CO}_3^{2-})$$

Un indice de saturation égal à zéro indique que l'eau est juste saturée par rapport à la calcite. Un indice positif indique une sursaturation et un indice négatif indique une sous-saturation. Un indice de - 1, par exemple, signifie que l'eau est 1/10 saturée par rapport au minéral considéré.

Le modèle géochimique utilisé est nommé PHREEQE [PARKHURST et al., 1982]. Il permet de calculer la distribution des espèces chimiques présentes dans l'eau dont on a préalablement déterminé la composition ionique. Il permet également de simuler les changements de composition susceptibles d'apparaître lors de réactions chimiques perturbant l'équilibre entre l'eau et les minéraux avec lesquels elle interagit.

Les résultats de ces calculs géochimiques sont présentés Tableau 2. L'indice de saturation de l'eau par rapport à la calcite est positif (+ 0,076). Ce qui signifie que l'eau est sursaturée par rapport à la calcite. Cette apparente sursaturation est probablement causée par des pertes de CO₂ gaz lors ou après les prélèvements d'eau. Ce phénomène entraîne une précipitation de la calcite qui équivaut thermodynamiquement à une augmentation de son indice de saturation.

On a donc simulé l'état d'équilibre entre l'eau et la calcite, minéral susceptible d'être dans la Grande Oolithe celui avec lequel l'eau va réagir préférentiellement. Les résultats de cette simulation sont présentés Tableau 2. Ils sont interprétés de la façon suivante :

Tableau 2: Composition chimique et indices de saturation par rapport à différents minéraux de l'eau prélevée au forage S3 le 22 août 1988. Les concentrations des espèces carbonées et les indices de saturation ont été calculés avec le pH mesuré (1) puis ajustés pour obtenir l'équilibre entre l'eau et la calcite (2).

Température 12,7° C

	mg/l	meq/l	mmoles/l	%
Na ⁺	5,9	0,26	0,26	4,84
K ⁺	1,9	0,05	0,05	0,93
Mg ²⁺	10,4	0,86	0,43	16,01
Ca ²⁺	84,0	4,20	2,10	78,21
Somme cations		5,37		
SO ₄ ²⁻	23,0	0,48	0,24	8,9
Cl ⁻	9,9	0,28	0,28	5,2
NO ₃ ⁻	6,5	0,10	0,10	1,9
Alcalinité totale (HCO ₃ ⁻)	275,0	4,51	4,51	84,0
Somme anions		5,37		

	(1)	(2)
CONCENTRATIONS CALCULÉES (mmoles/l)		
CO ₂ (aq)	5,20E-01	6,21E-01
HCO ₃ ⁻	4,485	4,489
CO ₃ ²⁻	1,15E-02	9,68E-03

INDICE DE SATURATION

calcite	0,076	0,000
dolomite	-0,646	-0,799
gypse	-2,126	-2,126
anhydrite	-2,608	-2,608
log pCO ₂ (bars)	-1,970	-1,893
pH mesuré	7,35	
pH calculé pour saturation calcite		7,27

En équilibre chimique avec la calcite l'eau prélevée au forage S3 à Bellerive n'a pas encore eu l'opportunité de réagir significativement avec les minéraux dolomite, gypse et anhydrite. En d'autres termes, cette eau a réagi chimiquement avec un environnement principalement carbonaté calcaire.

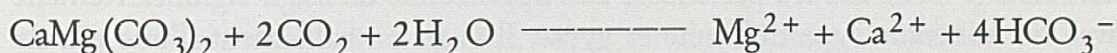
On retrace son évolution géochimique de la manière suivante: L'eau infiltrée depuis la surface possède la composition chimique moyenne suivante [ZOBRIST, 1985], concentrations exprimées en mmoles/l:

Ca ²⁺	0,06	Mg ²⁺	0,01
Cl ⁻	0,08	(Na ⁺ + K ⁺)	0,02
SO ₄ ²⁻	0,01		

Elle constitue la recharge.

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	(Na ⁺ + K ⁺)
RECHARGE	0,06	0,01		0,01	0,08	0,02
Dissolution de dolomite	0,42	0,42	1,68			
Dissolution des sulfates	0,23			0,23		
Dissolution des chlorures					0,20	0,20
Dissolution des sels de carbonates			0,09			0,09
Dissolution de calcite	1,37		2,74			
S3 Bellerive	2,10	0,43	4,51	0,24	0,28	0,31

La différence entre les concentrations en magnésium de l'eau de recharge et de l'eau S3 (0,42) provient principalement de la dissolution de la dolomite CaMg(CO₃)₂. Ce qui entraîne qu'à chaque concentration molaire de Mg mise en solution correspond 1 concentration de Ca (0,42) et 4 concentrations de l'ion bicarbonaté (1.68):



On procède de la même manière pour les sulfates, les chlorures, le sodium et le potassium. Enfin, on déduit simplement la concentration en Ca²⁺ et l'alcalinité

totale provenant de la dissolution de la calcite. Il faut cependant remarquer l'importance de cette dernière puisque, comme on a pu le mettre en évidence auparavant, cette eau réagit principalement avec la calcite.

4.4 Conclusions géochimie

L'eau prélevée au forage S3 à Bellerive est une eau de type chimique Ca-HCO₃. Il s'agit d'une eau de pluie infiltrée dans le sous-sol et qui n'a pas de relations directes avec l'eau de la Birse. Lors de son parcours souterrain son évolution géochimique se réalise principalement au contact des roches calcaires de l'aquifère du Dogger (Grande Oolithe). Cette eau n'a pas encore eu l'opportunité de réagir significativement avec les minéraux type dolomite et gypse.

5. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les investigations hydrogéologiques réalisées pendant la campagne de forage dans les calcaires de la Grande Oolithe à Bellerive ont permis de mettre en évidence les faits suivants:

Qualité de l'eau

L'eau découverte en S3 présente les caractéristiques suivantes du point de vue de la potabilité:

	Forage S3 moyenne 6 analyses	Valeurs admises
Turbidité [FTU]	3,4 (1,4 sans la 1 ^{re} analyse)	
Oxydabilité [mg KMnO ₄ /l]	4,1	6,0
Ammonium [mg NH ₄ ⁺ /l]	0,05	0,02
Nitrite [mg NO ₂ ⁻ /l]	0	0
Nitrate [mg NO ₃ ⁻ /l]	6,7	40
Phosphate [mg PO ₄ ⁻ /l]	0,03	0,10

Du point de vue chimique, il s'agit d'une eau qui reste en dessous des valeurs maximales admises, à part pour l'ammonium. Elle est de type chimique Ca-HCO₃. Cette eau n'a pas encore eu l'opportunité de réagir significativement avec les minéraux type dolomite et gypse. Il s'agit probablement d'une eau de précipitation atmosphérique qui a évolué au contact de l'aquifère calcaire karstifié de la Grande Oolithe inférieure. Cette eau n'a pas de relations directes avec la Birse ou le canal de Bellerive.

Du point de vue bactériologique, il s'agit d'une eau contaminée par des bactéries fécales:

- en moyenne 62 Eschérichia Coli/100 ml sur 9 analyses (min.: 26; max. 120)
- en moyenne 19 Entérocoques/100 ml sur 9 analyses (min.: 2; max. 36).

On notera la température 2-3 degrés plus élevée que celle des sources de la région (12,5 à 13,3° C mesurés pendant le pompage d'essai, les sources étant à environ 10° C). Ce phénomène mérite un complément d'étude (chaleur du moteur de la pompe immergée, gradient géothermique localement plus fort, etc.).

Caractéristiques du forage

Le débit maximum d'exploitation est de 18 m³/heure.

Le pompage d'essai de longue durée a mis en évidence un phénomène de pertes de charges transitoires qui diminuent le débit spécifique (débit par mètre de rabattement) du forage.

Il conviendrait, en cas de nouveaux forages dans ce secteur, de prévoir des opérations de développement (acidification sous pression) afin d'améliorer significativement le débit spécifique.

Caractéristiques de l'aquifère de la Grande Oolithe inférieure

Les paramètres hydrauliques sont les suivants:

- transmissivité: de 1,0 à 1,3 × 10⁻³ m²/s
- perméabilité moyenne: 1,5 × 10⁻⁵ m/s
- coefficient d'emmagasinement admis: de 2/1000 à 4/1000.

Approvisionnement en eau

Le débit exploitable découvert en S3 permet d'alimenter 850 habitants à 500 l/jour × habitant.

Au niveau jurassien, cette eau se classe parmi les eaux de bonne qualité, malgré la nécessité d'une légère désinfection. Aucune filtration n'est à envisager pour son exploitation.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements les plus vifs vont à la Ville de Delémont, plus particulièrement à M^{me} A. Bailat, conseillère municipale, et à M. R. Lachat, directeur des Services industriels.

Nous adressons également nos remerciements aux personnes suivantes:

— nos collègues et amis MM. F. Pasquier, J. Fernex et P.-A. Grétilat, pour la lecture critique du manuscrit et leurs suggestions pertinentes,

— M. A. Lièvre, chef du Laboratoire cantonal des eaux du Canton du Jura, pour nous avoir fait part de ses commentaires critiques mais constructifs concernant la partie géochimie de ce travail,

— notre collègue anglais, M. N. Platt de l'Institut de géologie de l'Université de Berne, pour la correction du paragraphe « Abstract ».

A tous nous adressons nos remerciements!

François Flury et Pierre Wexsteen

BIBLIOGRAPHIE

- BURGER, A. (1983): *Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura*. — Gaz-Eaux-Eaux usées, 1983/9. SSIGE, Zurich, 533-583.
- CASTANY, G. (1982): *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. — Dunod Université, Paris, 236 p.
- KRUSEMANN, G.P. & DE RIDDER, N.A. (1974): *Interprétation et discussion des pompages d'essai*. — ILRI, Wageningen, Pays-Bas.
- MARSILY, G. de (1981): *Hydrogéologie quantitative*. — Masson, Paris, 215 p.
- MULLER, I., GIBERT, J. & LAURENT, R. (1984): *Application des méthodes géophysiques, électromagnétiques VLF (very low frequency) et microsismique à l'étude du karst de Dorvan Cleysieu (Jura méridional, France)*. — Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel, 5, 145-162.
- PARKHUST, D.L., THORSTENSON, D.C. & PLUMMER, L.N. (1982): *PHREEQE. — A computer program for geochemical calculations*, U.S. Geological Survey, Water resources investigations 80-96, 210 p.
- SCHMASSMANN, H., BALDERER, W., KANZ, W. & PEKDEGER, A. (1984): *Beschaffenheit des Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten, Nagra technischer Bericht 84-21*, Baden Schweiz, 335 p.

- TRIPET, J.-P. (1984): *Etude des propriétés hydrauliques d'aquifères karstiques par des essais et mesures dans des forages*. (Bassin de Laufon, Jura suisse). — Bull. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel, 5, 39-70.
- WEXSTEEN, P. & MULLER, I. (1987): *Application de la méthode very low frequency - résistivité à l'étude des mofettes de la région de Scuol* (Basse-Engadine, Grisons, Suisse). — Arch. Sc. Genève Fasc. 2, p. 191-205.
- ZOBRIST, J. (1985): *Niederschlagschemismus*. In: Der Niederschlag in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, 31, Kümmerly & Frey, 278 p.

Rapports inédits

- FLURY, F., HENNET, R. & MATHYS, A. (1981): Hydrogéologie de la région Delémont-Develier. Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel.
- BUREAU P. MEURY & F. FLURY (1987): Approvisionnement en eau de la commune - Etude hydrogéologique. Services industriels de la ville de Delémont. 29 avril 1987.
- BUREAU P. MEURY & F. FLURY (1987): Mise en valeur de nouvelles ressources en eau. Avant-projet - Etude hydrogéologique. Services industriels de la ville de Delémont. 7 août 1987.
- BUREAU P. MEURY & F. FLURY (1988): Recherche d'eau souterraine à Belle-rive - Etude hydrogéologique. Services industriels de la ville de Delémont. 11 novembre 1988.
- BUREAU P. MEURY & F. FLURY (1989): Mise en valeur de l'aquifère du Malm au sud-ouest de la ville. Programme de forages d'exploitation. Services industriels de la ville de Delémont. 9 mars 1989.

¹Bureau P. Meury & F. Flury, géologues SIA, Molière 23, CH-2800 Delémont.

²Institut de Géologie, Baltzerstrasse 1, CH-3012 Berne.

Essai sur le régime hydrographique des rivières

de l'ingénieur en chef
M. L. L. L. L.

Paris, 1880

La qualité des rivières de France a subi depuis plus de dix ans des modifications profondes sous l'influence de deux causes principales : l'augmentation de la population et le développement de l'industrie.

Hydrographie

On a remarqué que les rivières de France ont subi depuis plus de dix ans des modifications profondes sous l'influence de deux causes principales : l'augmentation de la population et le développement de l'industrie.

- 1. Causes de l'augmentation de la population
- 2. Causes de l'augmentation de l'industrie
- 3. Causes de l'augmentation de la population
- 4. Causes de l'augmentation de l'industrie
- 5. Causes de l'augmentation de la population
- 6. Causes de l'augmentation de l'industrie
- 7. Causes de l'augmentation de la population
- 8. Causes de l'augmentation de l'industrie

