

Recherche d'eau par forages profonds dans le Dogger (Grande Oolithe) du Jura tabulaire à Courtemaîche (Jura, Suisse)

Jean-Marc Boem¹, François Flury¹ et Christian Rieben¹

Mots-clés: Jura tabulaire, hydrogéologie, karst, Dogger, forages profonds

Résumé

Une prospection par sismique réflexion de l'aquifère du Dogger du Jura tabulaire d'Ajoie a été réalisée en 1999 dans la région de Courtemaîche (canton du Jura). Elle a été suivie par l'exécution, en 2000, de trois forages de reconnaissance, verticaux, d'une profondeur moyenne de 400 m chacun. Après l'échec, en terme de débit, des deux premiers ouvrages, décision a été prise de recourir pour le 3e site retenu à un forage incliné. Ce dernier a recoupé une zone productive au sein du Dogger calcaire à environ 220 m de profondeur. Deux phases successives d'acidification ciblée ont permis un gain de productivité de plus de 200%. Après 20 jours de pompage, un régime d'équilibre a été atteint avec un débit de 475 l/min pour un abaissement du niveau d'eau de 140 m. Grâce à ces forages, de nouvelles connaissances ont été acquises. L'aquifère karstique du Dogger est captif (artésien non jaillissant). Il renferme des eaux saumâtres (très fortement minéralisées), impropres à la consommation, mais bactériologiquement saines et exemptes de micropolluants anthropiques. Ces eaux ont vraisemblablement une origine profonde. Le gradient géothermique mesuré par diagraphie présente en outre une légère anomalie positive probablement liée au graben du Rhin voisin.

Abstract

In 1999, water prospecting using seismic reflection methods was carried out in the Dogger aquifer of the Tabular Jura in and around Courtemaîche in the Ajoie district of the Canton of Jura. This prospecting was followed up in 2000 by three vertical exploration boreholes, each to an average depth of 400m. After the failure in terms of yield of the first two boreholes, the decision was taken to incline the third borehole. The inclined borehole cut through a productive zone in the Dogger limestone layer at a depth of around 220m. Two subsequent phases of targeted acidification then resulted in an increase

in productivity of more than 200%. After 20 days of pumping, a stable flow rate was established at 475 l/min, with a corresponding fall in the water level of 140m. As a result of these drillings, new knowledge has been gained on the nature of the artesian, non gushing Karstic Dogger aquifer. The aquifer holds brackish, very highly mineralised water that is unfit for consumption but is healthy in terms of bacteriology and exempt of anthropic micro-pollution. The aquifer water probably originates deep down. Moreover, the geothermal gradient shows a slight positive anomaly, probably related to the neighbouring Rhine rift valley.

Zusammenfassung

Im Jahre 1999 wurde in der Ajoie in der Umgebung von Courtemaîche (Kanton Jura) ein Grundwasserhorizont im Dogger des Tafeljura mittels Reflexionsseismik untersucht. Nachfolgend fanden im Jahr 2000 drei vertikale Schürfb Bohrungen statt mit einer durchschnittlichen Tiefe von 400 m pro Bohrung. Nach dem Misserfolg in Bezug auf die Ergiebigkeit der beiden ersten Bohrungen, wurde der Entschluss gefasst beim dritten Standort eine Schrägbohrung vorzunehmen. Dadurch wurde in einer Tiefe von zirka 220 m eine produktive Zone im Inneren des Kalk-Doggers geschnitten. Zwei aufeinanderfolgende gezielte Säuerungsphasen ergaben einen Produktionsgewinn von mehr als 200%. Nach 20tägigem Pumpen wurde ein Gleichgewichtszustand erreicht mit einer Ergiebigkeit von 475 l/min. bei einer Senkung des Wasserniveaus von 140 m. Dank dieser Bohrungen wurden neue Erkenntnisse gewonnen. Der karstische Grundwasserhorizont ist gespannt (artesisch, nicht hervorquellend). Er enthält brackisches, nicht trinkbares Wasser (sehr stark mineralisiert), aber bakteriologisch einwandfrei und frei von anthropogenen Schadstoffen. Das Wasser hat aller Wahrscheinlichkeit nach einen tiefen Ursprung. Die geothermische Tiefenstufe, die im Bohrloch gemessen wurde, weist ausserdem eine leicht positive Abnormität auf, welche wahrscheinlich mit dem naheliegenden Rheingraben verbunden ist.

¹ MFR Géologie-Géotechnique SA, Chaux 9, CH-2800 Delémont 1 et rue Oppliger 7, CH-2500 Biel/Bienne 3; jmarc.boem@mfr.ch

1. Introduction

1.1 Cadre général du projet

La réalisation de forages de reconnaissance de l'aquifère du Dogger (Grande Oolithe ou Hauptrogenstein) dans la plaine alluviale de Courtemaîche (canton du Jura, NW de la Suisse) avait été proposée dans le rapport d'impact (MFR, 1998) relatif au projet d'autoroute A16 à proximité de la frontière française (tronçon Boncourt - Porrentruy Ouest). Ces forages d'eau se justifiaient par l'existence d'impacts résiduels du projet A16 sur les eaux souterraines d'Ajoie et pouvaient être considérés à juste titre comme une mesure de compensation. Ils répondaient en outre à la nécessité d'assurer une adduction en eau de secours pour la commune de Boncourt. Enfin, ils représentaient une alternative intéressante pour couvrir les besoins en eau des futurs chantiers des tunnels A16 de Bure et du Neu Bois.

Le projet s'est déroulé en deux phases successives dont la première (MFR, 2001a) s'est attelée à mettre en valeur les données disponibles, effectuer une prospection géophysique (Géologie-Géophysique, 1999), déterminer les sites d'implantation des forages et concevoir un programme complet de forage. La seconde phase s'est concrétisée par l'exécution des forages et par la synthèse des résultats de reconnaissance (MFR, 2001b). Le financement de la totalité du projet a été assuré par la «Section route nationale» du Service des Ponts et Chaussées de la République et Canton du Jura.

Dans la mesure où ils concernent un aquifère important mais mal connu du NW de la Suisse et de l'Est de la France, nous avons jugé utile de présenter les résultats hydrogéologiques obtenus à Courtemaîche.

1.2 Rappel géologique et hydrogéologique

Le Jura tabulaire d'Ajoie, entité géologique au centre de laquelle se trouve la région de Courtemaîche, se situe entre le Jura plissé au Sud et le fossé rhénan au Nord. Il s'agit

d'une assise sub-horizontale composée de calcaires karstifiés du Jurassique supérieur (Malm), inclinée très légèrement vers le Nord et vers l'Est, recoupée principalement par des cassures méridiennes et creusée par la rivière Allaine. Au-delà de la frontière française vers le Nord, les formations calcaires d'âge secondaire s'ennoient sous les épaisses formations détritiques tertiaires du Sundgau, zone déprimée en bordure méridionale du fossé rhénan.

La lithostratigraphie des formations superficielles s'étend du Kimméridgien au Rauracien (Malm sup.). Elle est caractérisée par une succession d'importantes séries calcaires entrecoupées par des niveaux marneux moins importants. La puissante série marneuse de l'Oxfordien s.s. n'affleure pas dans la vallée de l'Allaine mais s'approche sensiblement de la surface. Le toit du Dogger calcaire, horizon-cible du projet, se situe quant à lui à une profondeur comprise entre 125 et 225 m sous la plaine alluviale de Courtemaîche.

Sur le plan régional, la fracturation est marquée par un réseau de fractures sub-verticales de directions N-S, N060 et N150. Parmi ces trois familles principales, les accidents verticaux d'orientation sub-méridienne (rhénane) prédominent et induisent un modelé caractéristique formé d'une succession de horsts et de grabens (structure en «touches de piano»). Les déplacements verticaux demeurent toutefois faibles (rejets apparents métriques à décimétriques). Quelques plis de faible amplitude se sont également développés dans la région de Porrentruy (en particulier l'anticlinal Perche-Banné).

L'ensemble du secteur est drainé superficiellement, du Sud vers le Nord, par l'Allaine qui représente le niveau de base des eaux souterraines, entre 430 m d'altitude en amont à Porrentruy et 365 m en aval à Boncourt. Aucun autre cours d'eau conséquent n'est à noter dans le secteur d'étude. Les plateaux bordiers alentours, dont la nature karstique est caractérisée entre autres par de nombreuses dolines et vallées sèches, sont dépourvus de cours d'eau superficiels.

Dans le contexte hydrogéologique général de l'Ajoie, les aquifères sont de nature essentiellement karstique. L'eau qui parcourt le massif rocheux du Malm calcaire aboutit finalement dans l'Allaine par l'intermédiaire des sources karstiques et des aquifères alluviaux peu épais (< 10 m). L'Oxfordien s.s. constitué de marnes très peu perméables représente l'aquiclude régional. L'aquifère calcaire du Dogger est situé au-dessous de cet horizon. Il est donc isolé de la surface et ne connaît a priori, en Ajoie, pas d'interaction avec les aquifères supérieurs du Malm.

1.3 Stratégie de prospection

Face aux interrogations demeurrées ouvertes après la première phase d'étude concernant notamment la ressource potentielle et la qualité des eaux de l'aquifère-cible du projet, nous avons proposé la stratégie de prospection suivante:

- sélection sur la base de critères sismiques, géologiques et de logistique des trois sites reconnus comme les plus pro-

metteurs (N°1 Petites Echiouses, N°2 Ancienne Carrière, N°3 Basse Fin);

- réalisation d'un forage de reconnaissance en petit diamètre (y compris acidification, essai de puits et pompage d'essai) d'une profondeur moyenne de 400 mètres sur chacun des sites retenus (Fig. 1);
- exécution conditionnelle, sur la base des résultats obtenus lors de la phase de reconnaissance, d'un forage d'exploitation en gros diamètre sur le meilleur des trois sites.

Cette stratégie de prospection nous paraissait alors optimale. Elle permettait en effet de limiter le risque financier pris par le Maître d'ouvrage.

Les deux premiers forages (N°1 Petites Echiouses et N°2 Ancienne Carrière) ont été implantés sur des anomalies géophysiques interprétées comme des accidents verticaux majeurs pouvant se révéler aquifères. Pour des raisons que nous ignorons, notre démarche s'est soldée par deux échecs (débits quasi nuls). Pour le 3e forage, nous avons alors

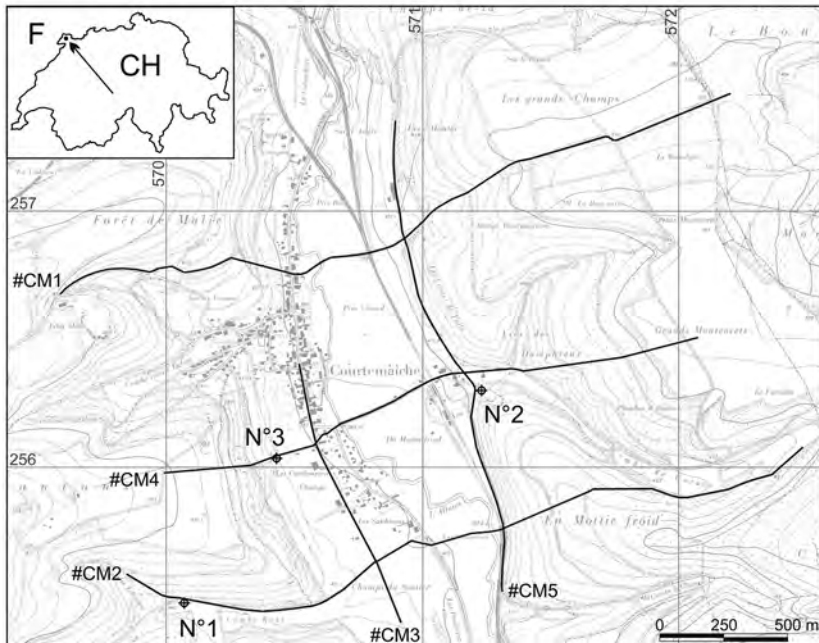


Fig. 1: Traces des profils sismiques réalisés et emplacements des trois forages de reconnaissance

pris la décision de changer de stratégie et, en accord avec le Maître d'ouvrage, avons opté pour recouper par un forage incliné la zone de faille N-S mise en évidence au pied du flanc W de la vallée de l'Allaine afin d'augmenter la probabilité de traverser, au niveau des calcaires du Dogger, les «domaines» aquifères supposés verticaux (Fig. 2). De fait, nous avons implanté le troisième et dernier forage sur le site initialement prévu

de la Basse Fin mais l'avons orienté vers le NNE (N020) avec une inclinaison initiale de 35° par rapport à la verticale. Si l'orientation imposée a été bien respectée, l'inclinaison du trou a, dès l'Oxfordien s.s., progressivement augmenté jusqu'à un maximum de 64° (par rapport à la verticale), sans qu'aucune mesure technique raisonnable ne permette de la corriger.

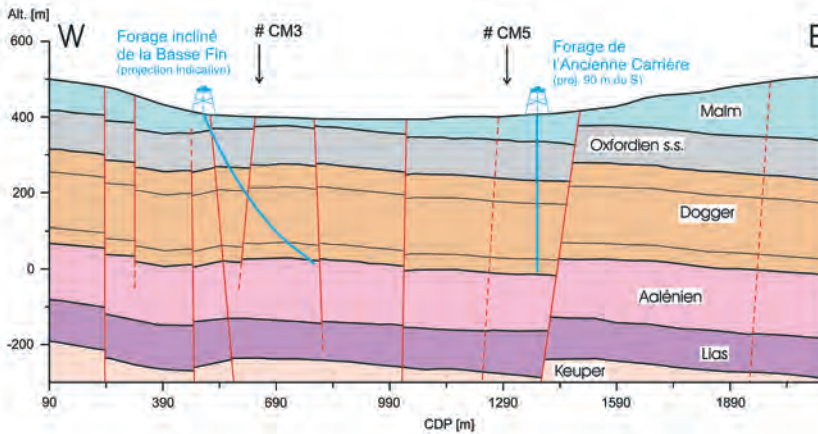


Fig. 2: Modèle géologique développé du profil sismique CM4, avec projection indicative du forage incliné de la Basse Fin (N°3)

2. Résultats des trois forages profonds

2.1 Stratigraphie synthétique

Le document de synthèse stratigraphique de la figure 3 illustre la corrélation, entre ouvrages, des formations géologiques recoupées, ainsi que leurs épaisseurs réelles respectives (obtenues par calcul dans le cas du forage incliné de la Basse Fin). Pour ce faire, nous avons admis une disposition des formations géologiques en couches horizontales et le non-recoupement de failles avec rejet. Sur cette figure, nous avons arbitrairement choisi la limite Callovien-Bathonien (toit de la Grande Oolithe, aquifère cible du projet) comme référence horizontale.

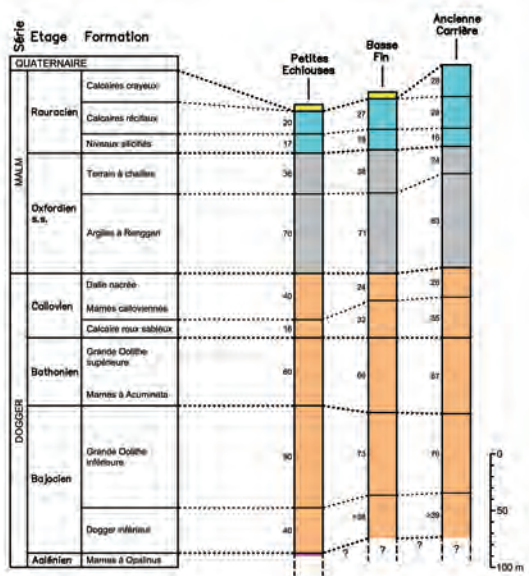


Fig. 3: Synthèse stratigraphique et corrélation entre ouvrages

2.2 Données hydrogéologiques

2.2.1 Résultats d'ensemble

Du point de vue hydrogéologique, le forage de reconnaissance N°1 implanté aux Petites Echioues a été un échec complet. Nous en ignorons les raisons mais nous pouvons avancer les hypothèses suivantes:

- non-recoupement des accidents tectoniques mis en évidence;
- failles colmatées ou ne présentant pas de vides aquifères;
- réseau karstique peu ou pas développé.

Le second forage de reconnaissance situé à l'entrée de l'Ancienne Carrière de Courtemaîche n'a guère rencontré plus de succès. Seule une très faible venue d'eau a été mise en évidence dans la Grande Oolithe, sans qu'il soit possible de la localiser. Après deux acidifications successives, le débit de cette

venue est resté insignifiant, de l'ordre de 1 à 2 l/min. Les raisons de ce second échec sont identiques à celles évoquées pour le cas des Petites Echioues, sans qu'il soit possible d'y apporter plus de précisions.

La décision de recourir à un forage incliné pour notre troisième tentative (site de la Basse Fin) a été judicieuse puisqu'une zone productive a été recoupée au niveau du Dogger calcaire (Fig. 4). Les résultats détaillés du forage N°3 de la Basse Fin sont présentés et discutés ci-dessous.

2.2.2 Diagraphies géophysiques

Trois types de sondes ont été employés dans le forage de la Basse Fin: une sonde «conductivité-température» utilisée lors de trois séquences de mesure sous divers régimes hydrauliques, un diamètre à 4 bras pour la reconnaissance des zones fractu-

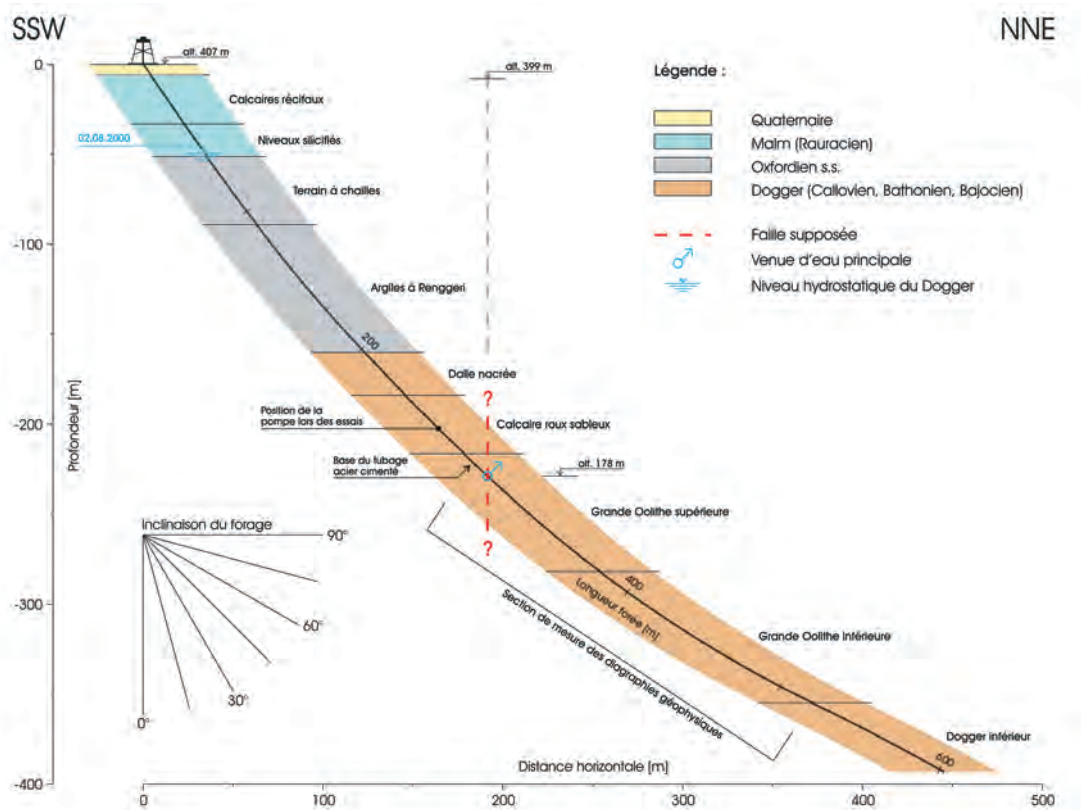


Fig. 4: Profil en long géologique développé du forage incliné de la Basse Fin (N°3)

rées, et un micro-moulinet destiné à la mesure de la vitesse de circulation de l'eau dans l'ouvrage avec, dans notre cas, un débit d'injection imposé en tête de puits.

Les principaux résultats de ces diagraphies sont les suivants:

- Deux importantes zones fracturées ont été mises en évidence dans la section supérieure de la Grande Oolithe, entre 298 et 300 m de profondeur relative (exprimée en longueur forée), ainsi qu'entre 306 et 313 m.
- A l'exception de ces deux zones, la formation de la Grande Oolithe apparaît dans son ensemble peu à très peu fracturée.
- Une seule et unique venue d'eau significative a été identifiée. Située à 299 m de profondeur relative, elle est en parfaite concordance avec la première zone fracturée mise en évidence. La seconde zone fracturée apparaît en revanche improductive.

Les mesures conjointes de température et conductivité électrique ont confirmé les résultats précédents tout en dévoilant l'existence de pertes/venues secondaires minimes (de l'ordre du l/min) au-delà de 365 m de profondeur relative. Leur localisation précise n'a pas été possible mais elles sont probablement liées à l'une ou l'autre des rares fractures identifiées grâce au diamètre (par exemple à 380, 434 et 465 m de profondeur relative). Les mesures de conductivité électrique ont également rapidement mis en lumière la minéralisation élevée des eaux captées (~2-3 g/l à ce moment-là), et ce malgré un mélange avec l'eau du réseau communal injectée dans l'aquifère lors des travaux de forage (~1'500 m³).

Les informations obtenues par diagraphies ont encore été confrontées aux profils sismiques et modèles géologiques du secteur. Ainsi:

- La fracture principale recoupée par le forage correspond à une faille verticale d'importance régionale orientée N170 et reconnue sur les profils sismiques CM1 et CM4 (MFR, 2001a). Elle est associée à une zone tectoniquement perturbée située en

bordure W de la plaine alluviale de Courtemaîche.

- Cette faille ne semble affectée d'aucun rejet vertical significatif au droit de la Basse Fin.
- La zone productive rencontrée dans la partie supérieure de la Grande Oolithe concorde relativement bien avec l'anomalie négative de vitesse identifiée au sein du Dogger.
- La venue d'eau principale se situe à une profondeur réelle de 221 m (ce qui correspond à une altitude de 178 m.s.m.).

Le succès, en termes quantitatifs du moins, de ce forage confirme le bien-fondé de la démarche appliquée et des critères retenus pour le choix du site de la Basse Fin, ainsi que du changement de stratégie intervenu à la suite à des deux premiers échecs.

2.2.3 Développement par acidification et pompage d'essai de longue durée

Deux phases successives d'acidification ont permis d'améliorer significativement la productivité de l'ouvrage. En effet, des essais de puits par paliers enchaînés réalisés avant et après le développement du forage ont mis en évidence un gain de plus de 200% (Fig. 5).

Un pompage d'essai de longue durée s'est ensuite déroulé du 02 au 22 août 2000 (Fig. 6).

Dans un premier temps, le débit de la pompe immergée a été maintenu autour de 650 l/min (valeur du débit critique déterminé lors des essais de puits). L'augmentation persistante du rabattement nous a contraint à diminuer ce débit jusqu'à une valeur moyenne de 480 l/min. Celui-ci est demeuré globalement stable dès la mi-journée du 08 août, avec néanmoins une très légère tendance à la baisse (~475 l/min au moment de l'arrêt définitif de la pompe). Ce sont au total environ 14'500 m³ d'eau qui ont été extraits de l'aquifère lors de cet essai. L'abaissement du niveau d'eau, mesuré indirectement par une cellule de pression immergée, s'est lui

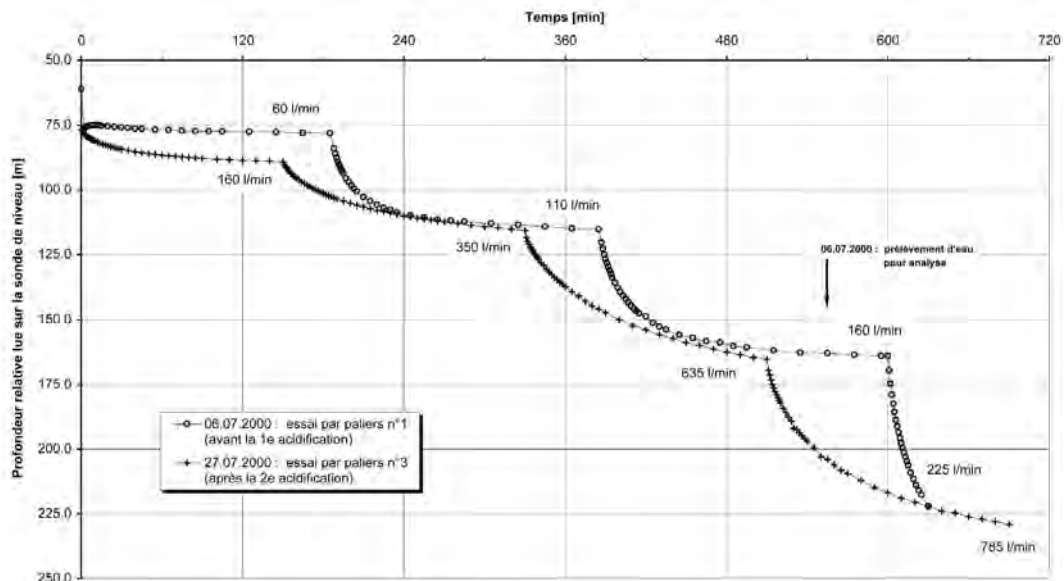


Fig. 5: Courbes caractéristiques du forage incliné de la Basse Fin établies d'après les résultats des essais de puits réalisés avant et après le développement de l'ouvrage

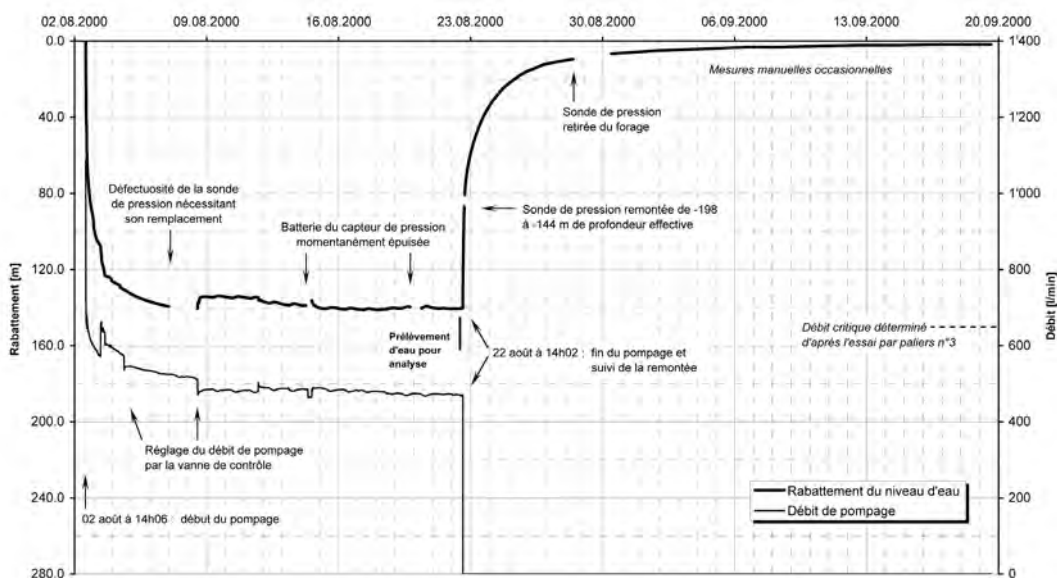


Fig. 6: Evolution du rabattement lors du pompage d'essai de longue durée réalisé en août 2000 dans le forage incliné de la Basse Fin, et remontée du niveau d'eau après arrêt de la pompe

aussi peu à peu stabilisé à partir du 08 août, sans toutefois atteindre un palier significatif d'un régime d'écoulement permanent. Sa valeur en fin d'essai le 22 août avoisinait les 140 mètres.

Après l'arrêt définitif de la pompe le 22 août, nous avons continué les observations pendant presque un mois complet. Le dernier jour d'observation (le 19.09.2000), l'aquifère n'avait pas encore retrouvé son niveau

initial de début août (rabattement résiduel ~1.5 m).

Aucune mesure piézométrique conjointe n'a pu être réalisée dans les forages des Petites Echioues et de l'Ancienne Carrière. Ceci restreint malheureusement les possibilités d'interprétation du pompage d'essai ainsi que la portée régionale des paramètres hydrauliques déterminés (Tab. 1).

Méthode utilisée	Transmissivité [m^2/s]
courbe caractéristique de Theis	3.5 à 5.0 x 10 ⁻⁵
approximation logarithmique de Jacob (pompage)	5.2 x 10 ⁻⁵
approximation logarithmique de Jacob (remontée)	3.3 x 10 ⁻⁵

Tab. 1: Résultats des calculs de transmissivité

Le coefficient de transmissivité se situe dans une fourchette comprise entre 3.3 et 5.2 x 10⁻⁵ m²/s. Rapporté à l'épaisseur moyenne de l'aquifère (140 m pour la seule Grande Oolithe), il correspond à une perméabilité de 2.4 à 3.7 x 10⁻⁷ m/s. Il s'agit en valeur absolue d'un faible degré de perméabilité et ce résultat caractérise de fait un « bloc peu perméable ». Mais si l'on ne prend en compte que les zones effectivement productives recoupées par le forage, soit environ 2 mètres d'épaisseur totale, la perméabilité résultante s'élève alors entre 1.7 et 2.6 x 10⁻⁵ m/s, ce qui cette fois correspond en valeur absolue à un degré moyen de perméabilité. Ces deux coefficients de perméabilité traduisent en fait l'hétérogénéité et le caractère discontinu de tout aquifère karstique. Ils sont marqués par un effet d'échelle et n'ont pas de véritable portée régionale.

Parallèlement au pompage d'essai de longue durée, nous avons suivi l'évolution des principaux paramètres physiques (conductivité électrique et température) des eaux captées à l'aide d'un acquiseur automatique de données, de type Madd (Fig. 7):

- La courbe de température est marquée par des variations journalières dues uniquement aux particularités du dispositif

de mesure mis en place. Ces variations cycliques diurne/nocturne n'ont pas d'incidence particulière sur nos observations.

- La température moyenne des eaux captées s'élève à 21.5°C.
- On décèle une légère tendance à la hausse de la température conjointement à l'accroissement du temps de pompage. Cette tendance pourrait traduire la sollicitation progressive de réserves d'eau plus profondes.
- La conductivité électrique est encore très fortement marquée par les résidus d'acide présents dans les eaux souterraines consécutivement aux opérations de développement de l'ouvrage menées dans une phase antérieure.
- Dès le 19 août, la conductivité atteint un palier considéré comme représentatif de l'aquifère. Sa valeur moyenne est de 10.1 mS/cm, ce qui correspond à une minéralisation totale approximative de 8.6 g/l.

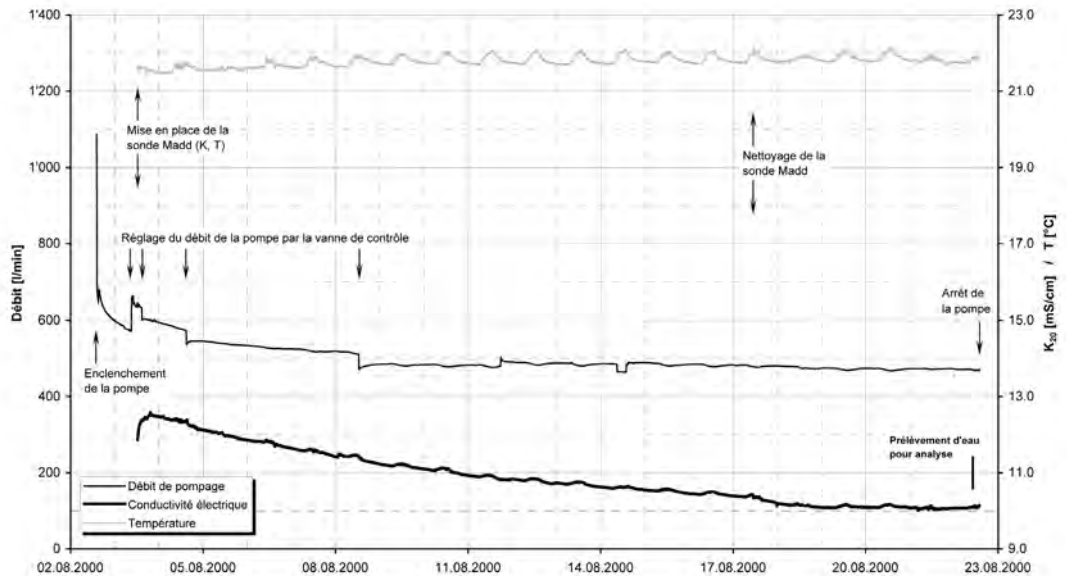


Fig. 7: Evolution de la température et de la conductivité des eaux captées lors du pompage d'essai de longue durée réalisé en août 2000 dans le forage incliné de la Basse Fin

2.2.4 Niveau piézométrique régional

Les calcaires du Dogger constituent donc un aquifère karstique captif (ou artésien non jaillissant) dont le niveau piézométrique moyen se situe à une altitude relativement constante comprise entre 355 et 360 m.s.m., soit 35 à 40 mètres sous la surface de la plaine alluviale de Courtemaîche. La période d'observation ne s'étend toutefois guère au-delà de deux mois. Nous ne pouvons donc faire aucune supposition quant à son amplitude de variation.

Le seul point de comparaison existant concerne le forage de St-Dizier en France voisine (à 6 km à l'Ouest de Courtemaîche). Aucune donnée n'est disponible pour l'ancien forage profond de Buix (Schmidt et al., 1924). Les forages au Dogger dans le synclinal de Laufon (Motor Columbus AG, 1981) participent, quant à eux, d'un contexte hydrogéologique totalement différent. Aucune comparaison n'est donc possible.

A St-Dizier, le niveau hydrostatique enregistré à deux reprises (en février 98 et avril 99) se situe à une cote altimétrique de, respectivement, 343 et 375 mètres. Ces valeurs sont

donc de l'ordre de grandeur de nos propres mesures à Courtemaîche. Remarquons que les principaux affleurements du Dogger évoqués comme zones probables de recharge de l'aquifère se trouvent également à une altitude similaire:

- Direction WSW Pont-de-Roide ~350 m
- Direction W Montbéliard ~320 m
- Direction NW Héricourt ~360 m
- Direction NNW Belfort ~360 m

Dans l'hypothèse évoquée ci-après d'une alimentation de l'aquifère du Dogger par des eaux souterraines profondes originaires du socle cristallin et/ou du Trias, les zones probables de recharge mentionnées ci-dessus pourraient en fait être des zones de décharge de l'aquifère. La cohérence observée entre la charge hydraulique mesurée à Courtemaîche et l'altitude des principaux affleurements du Dogger ne contredit en tous cas pas cette possibilité.

2.2.5 Gradient géothermique

Lors des opérations de diagrapie géophysique, nous avons dans un premier temps

mesuré la température de l'eau au repos sur toute la longueur de l'ouvrage. Ce «run» initial est intervenu 4 jours après le premier essai de puits et a vraisemblablement été effectué dans des conditions d'équilibre

thermique eau/roche. La corrélation linéaire de la température enregistrée rapportée à la profondeur réelle de la sonde traduit ainsi un gradient géothermique moyen, à l'état statique, de 3.6°C/100m (Fig. 8).

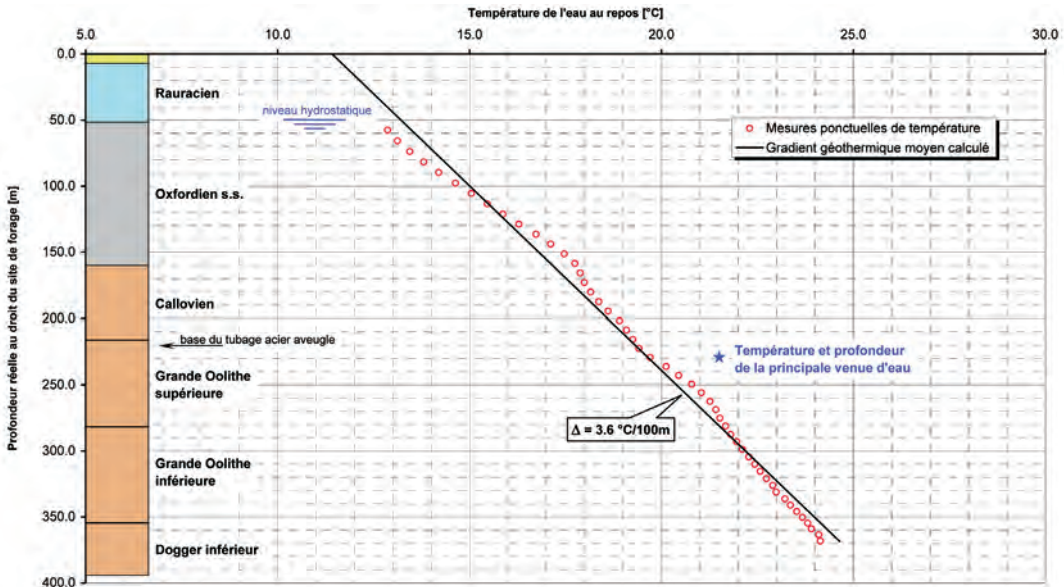


Fig. 8: Evolution de la température de l'eau dans le forage incliné de la Basse Fin en fonction de la profondeur réelle de la sonde de mesure (diagraphie du 11.07.2000 réalisée en régime hydrostatique)

Comparée au gradient théorique normal de 3°C/100m, cette valeur démontre une légère anomalie positive, en parfaite cohérence avec l'anomalie géothermique du graben du Rhin mise en évidence à l'Ouest de Bâle. Cette dernière, d'origine tectonique, étend donc son influence jusqu'en Ajoie. La valeur moyenne obtenue ci-dessus par corrélation linéaire apparaît en revanche nettement inférieure au gradient de 5.1°C/100m mesuré à Buix en avril 1919 peu après l'achèvement du forage (Schmidt et al., 1924). Nous n'expliquons pas cette importante différence. L'analyse détaillée des mesures dans le forage incliné de la Basse Fin montre en outre que l'évolution de la température en fonction de la profondeur n'est pas parfaitement linéaire. Des fluctuations apparaissent et permettent de décomposer la droite de corrélation en deux sections distinctes, en

concordance avec la lithologie des formations géologiques recoupées. La section supérieure, correspondant aux marnes oxfordiennes, présente ainsi un gradient géothermique moyen de 4.9°C/100m. La section inférieure, associée au Dogger calcaire, présente quant à elle un gradient nettement plus faible, de 3.2°C/100m. La raison de cette non-linéarité ne nous est pas connue. Les conditions de perméabilité et d'écoulement naturel, différentes entre l'Oxfordien s.s. et le Dogger, pourraient constituer un premier facteur d'explication. En régime hydrodynamique, la situation est différente. Les température et profondeur de la seule venue d'eau identifiée ne s'intègrent pas à la corrélation linéaire déterminée pour un état statique. Les eaux captées à une profondeur réelle de 221 mètres ont en effet une température moyenne de 21.5°C, soit ~2

degrés de plus que la valeur mesurée au repos à la même profondeur. Ceci pourrait très simplement signifier qu'en phase de pompage on sollicite, par l'intermédiaire de la faille régionale recoupée par le forage, les eaux d'un système karstique développé à plus grande profondeur, éventuellement dans les calcaires de la Grande Oolithe inférieure. Cette hypothèse – remontée d'eaux chaudes profondes – ne saurait toutefois être à l'origine de la légère anomalie géothermique positive observée à Courtemaîche. Les écoulements naturels au sein de l'aquifère du Dogger sont manifestement trop faibles pour permettre un réchauffement général et durable du massif rocheux.

Il est enfin intéressant de noter que les caractéristiques géothermiques de la seule venue d'eau identifiée s'inscrivent dans le prolongement exact du gradient moyen associé aux marnes de l'Oxfordien s.s.. Ce dernier est d'ailleurs de l'ordre de grandeur du gradient géothermique mesuré à Buix.

2.2.6 Aspects qualitatifs

Nous disposons des résultats d'analyse de trois échantillons distincts pour caractériser les eaux captées dans l'aquifère du Dogger (Tab. 2). Les deux premiers concernent le forage incliné de la Basse Fin à Courtemaîche et le troisième, plus ancien, se rapporte au forage de St-Dizier en France voisine (à 6 km à l'Ouest de Courtemaîche).

L'interprétation de ces résultats doit cependant tenir compte des faits suivants :

- L'échantillon du 06.07.2000 a été prélevé lors du premier essai de puits. Il n'est que partiellement représentatif de l'aquifère car marqué par les travaux de forage (pertes d'eau compensées par un apport d'environ 1'500 m³ à partir du réseau communal de Courtemaîche).
- L'échantillon du 22.08.2000 a été prélevé le dernier jour du pompage d'essai de longue durée, hors de toute influence externe comme en témoigne l'évolution de la conductivité électrique des eaux captées.

Cet échantillon peut être pris comme référence absolue.

- Nous ne connaissons pas les conditions de prélèvement de l'échantillon de St-Dizier. Seuls les résultats d'analyse nous ont été communiqués par la Direction régionale de l'environnement (DIREN) de Franche-Comté. Sa similitude avec le premier échantillon de Courtemaîche laisse entrevoir un possible mélange (naturel/artificiel?) avec d'autres eaux.

Dès lors, la description typologique des eaux de l'aquifère du Dogger se base essentiellement sur les résultats d'analyse de l'échantillon du 22 août 2000 prélevé à la Basse Fin. Nous sommes ainsi en présence d'eaux saumâtres, très riches en sodium, magnésium, chlorures et sulfates. Elles sont impropres à la consommation, nombre d'éléments chimiques dépassant les principales normes de potabilité. Elles sont toutefois bactériologiquement saines et exemptes de polluants organiques d'origine industrielle.

Les eaux captées à Courtemaîche ont en outre pour caractéristiques marquantes:

- une température plus élevée que la normale;
- une conductivité électrique de plus de 10'000 µS/cm (contre env. 500 µS/cm pour les eaux captées par les communes dans la plaine alluviale de l'Allaine), laquelle équivaut à une minéralisation moyenne de 8.6 g/l composée pour l'essentiel de sel (chlorure de sodium);
- un faible taux de saturation en oxygène, indicateur de conditions réductrices au niveau de l'aquifère du Dogger;
- une turbidité moyenne vraisemblablement due à la présence d'argiles de décolmatage et/ou de colloïdes (notamment des précipités du fer);
- une dureté totale excessive, à mettre en relation avec les fortes concentrations mesurées en chlorures et en sulfates principalement;
- des teneurs très élevées en ions calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorure

Station	Courtemaîche Basse Fin		St-Dizier	MSDA/OSEC Eau de boisson		OEaux Eau potable
	06.07.2000	22.08.2000		22.04.1998	Objectif de qualité	
Date de prélèvement	06.07.2000	22.08.2000	22.04.1998	Objectif de qualité	Limite de tolérance	Exigence
pH	7.75	6.9 *	7.55	7-8	9.2	
Température °C	22.2 *	22.0 *	13	8-15	25	
Conductivité à 20° µS/cm	4'180 *	10'180 *	3'077			
Oxygène dissous mg/l		2.8 *	6.9			
Saturation en oxygène %		24 *		> 60		
Turbidité 90° FTU	16	5.5	0.55	≤ 0.5	1.0	
Absorption UV 254 cm ⁻¹	0.044	0.039				
Oxydabilité mg/l O ₂	11.2	18.6	2.2			
DOC mg/l	0.6	0.8		≤ 1.0		2
Alcalinité °f	16.9	22.5	24.4			
Dureté totale °f	78.8	194		15-25		
Calcium mg/l	138	315	77.5	40-125		
Magnésium mg/l	108	280	65	5-30	50	
Sodium mg/l	600	1'640	525	≤ 20	150	
Potassium mg/l	17	40	14.7	≤ 10		
Ammonium mg/l	1.71	3.1	0.8	≤ 0.05	0.5	0.1 / 0.5 °
Nitrite mg/l	0.117	< 0.002	< 0.02	≤ 0.01	0.1	
Nitrate mg/l	< 1	< 5	< 0.2	≤ 25	40	25
Chlorure mg/l	1'300	3'610	912	≤ 20	200	40
Sulfate mg/l	116	220	130	10-50	200	40
Phosphate mg/l	< 0.01	0.02	< 0.07	≤ 0.05		
Fluorure mg/l	< 1	< 5	3.5		1.5	
Cyanure libre µg/l	< 5	< 5	< 20		50	
Lithium µg/l	420	684				
Béryllium µg/l	< 0.1	2.1				
Bore µg/l	280		195			
Aluminium µg/l	25	≤ 20	< 60	≤ 50	200	
Phosphore µg/l	< 0.1	161				
Scandium µg/l	1.5					
Titane µg/l	3	≤ 3				
Vanadium µg/l	3	9				
Chrome µg/l	1.5	5	< 10	≤ 1 **	20 **	
Manganèse µg/l	34	23	< 10	≤ 20	50	
Fer (total) µg/l	2'050		< 100	≤ 50	300	
Fe ₂ dissous µg/l		640				
Cobalt µg/l	0.5	13				
Nickel µg/l	< 0.1	11	15			
Cuivre µg/l	1.4	23	< 10	≤ 50	1'500	
Zinc µg/l	16	13	< 10	≤ 100	5'000	
Arsenic µg/l	3.8	3	3	≤ 2	50	
Sélénium µg/l	12	≤ 2.5	< 2	≤ 1	10	
Brome µg/l	8'500					
Strontium µg/l	10'700	23'182				
Molybdène µg/l	8	≤ 3				
Argent µg/l	< 0.1	≤ 2	2		100	
Cadmium µg/l	< 0.1	≤ 0.5	< 5	≤ 0.5	5	
Etain µg/l	< 0.1	≤ 20				
Antimoine µg/l	0.2		< 10			
Iode µg/l	75					
Césium µg/l	0.25					
Baryum µg/l	55	67	40			
Tungstène µg/l	0.6					
Mercure µg/l	< 0.1	≤ 1	< 0.1	≤ 0.1	1	
Plomb µg/l	< 0.1	25	20	≤ 1	50	
Uranium µg/l	0.15					
Escherichia coli germes/100 ml	0	0	< 2		0	
Entérocoques germes/100 ml	0	0	0		0	
Germes aérobies germes/ml	> 2'500	288	82		100	

* mesure sur le terrain

° conditions oxydantes / anoxiques

** chrome VI

MSDA : Manuel suisse des denrées alimentaires

OEaux : Ordonnance sur la protection des eaux (28.10.98)

OSEC : Ordonnance sur les substances étrangères et les composants dans les denrées alimentaires (26.06.95)

Les données de St-Dizier nous ont été fournies par la Direction régionale de l'environnement (DIREN) de Franche-Comté

Tab. 2: Récapitulatif des résultats d'analyses chimiques et bactériologiques des eaux captées dans l'aquifère du Dogger à Courtemaîche et à St-Dizier (F)

et sulfate à l'origine de la forte minéralisation observée et typiques, pour certains, d'horizons dolomitiques et pour d'autres, de niveaux évaporitiques profonds (sel gemme, gypse et anhydrite);

- une présence d'azote sous forme réduite (ammonium) aux dépens des formes oxydées (nitrite et nitrate), à mettre en parallèle avec le peu d'oxygène présent dans les eaux captées;
- une absence de nitrates généralement associés aux activités humaines, mettant ainsi en évidence la protection de l'aquifère face aux atteintes superficielles;
- une concentration non négligeable en divers éléments chimiques (lithium, bore, phosphore, arsenic, sélénium, brome, strontium, iode, baryum et plomb), lesquels ont pour la plupart une origine profonde directement liée aux dépôts triasiques;
- une teneur importante en fer total et dissous (ainsi qu'en manganèse, lequel lui est géochimiquement associé) en accord

avec les conditions d'oxydoréduction prévalant dans l'aquifère et, accessoirement, avec la nature même du massif rocheux (calcaire à oolithes ferrugineuses, avec présence occasionnelle de pyrite);

- une absence totale de micropolluants anthropiques (composés polyaromatiques, solvants chlorés, hydrocarbures benzéniques et hydrocarbures volatils) mettant ainsi en lumière le rôle protecteur des terrains oxfordiens aquicludés sus-jacents;
- une qualité bactériologique irréprochable (les germes aérobies en excès sont très certainement liés aux travaux de forage et non à l'aquifère exploité).

Nous avons également comparé les caractéristiques principales des eaux du Dogger de Courtemaîche à celles d'autres eaux leur étant proches soit par l'origine, soit par le type d'aquifère auquel elles se rapportent (Fig. 9).

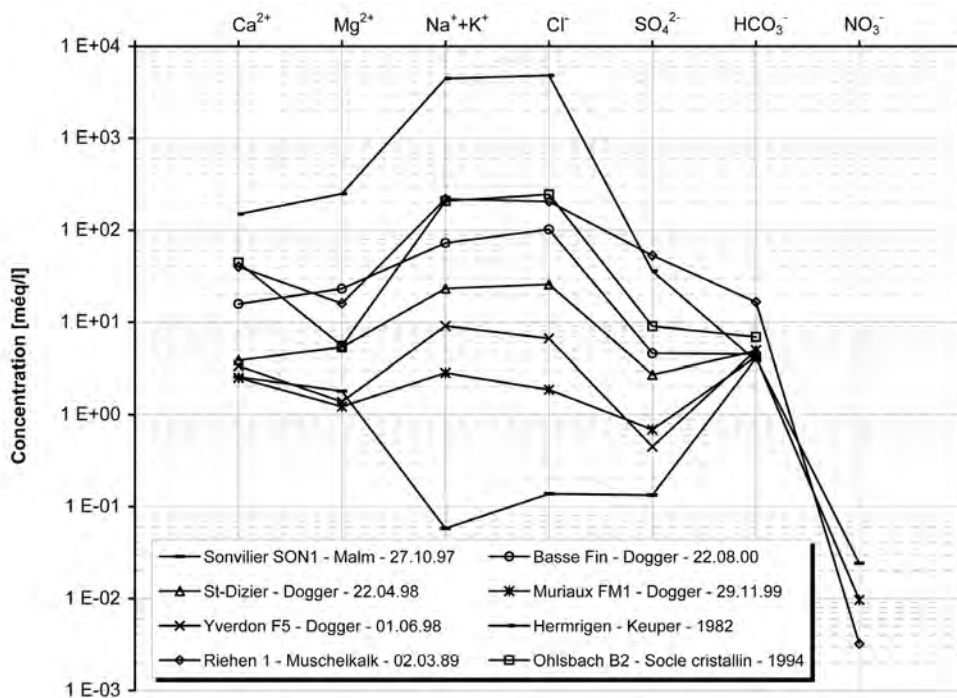


Fig. 9: Diagramme de Schoeller-Berkaloff représentant les concentrations en éléments majeurs de différents types d'eau

Cette comparaison graphique traduit bien la position intermédiaire des eaux de la Basse Fin, notamment au niveau des éléments Na, K, Cl et SO₄. Elles prennent ainsi place entre les eaux représentatives d'autres aquifères explorés du Dogger (Yverdon: Vuataz et al., 1999 et Muriaux: Hessenauer et al., 2001) et celles profondes issues du socle cristallin (Forêt Noire – eau de mer fossile (Stober et al., 1999)). Il serait donc imaginable d'avoir un mélange de deux types d'eau :

- D'une part des eaux réduites, riches en fer, caractéristiques du Dogger en général (composante minoritaire).
- D'autre part des eaux profondes issues du socle granitique et enrichies en éléments salins au passage des horizons évaporitiques du Trias (composante majoritaire).

Il est également envisageable de n'avoir, dans cet aquifère du Dogger calcaire, que des eaux d'origine profonde ayant acquis, au cours de leur séjour souterrain, certaines caractéristiques de la roche réservoir.

2.2.7 Analyses isotopiques

L'échantillon d'eau du 22.08.2000 a également été soumis à des analyses isotopiques (Tab. 3).

La concentration en tritium apparaît inférieure au seuil de détection de l'appareil de mesure. Pour le laboratoire d'analyse, les eaux captées à Courtemaîche sont âgées de

plus de 50 ans et correspondent à l'infiltration de précipitations antérieures à 1952, date des premiers essais thermonucléaires aériens. Pour OLIVE & al. (Olive et al., 1995), des valeurs inférieures à 2 UT sont plutôt caractéristiques d'eaux provenant d'aquifères profonds ou dont le temps de séjour est de 1'000 à 2'000 ans. Seule la mise en oeuvre d'analyses isotopiques complémentaires (par exemple carbone-14 et argon-39) permettrait de préciser l'âge de ces eaux.

La teneur en oxygène-18 est un bon indicateur de l'altitude moyenne du bassin versant. De l'avis de M. Schotterer de l'Institut de physique de l'Université de Berne, la valeur d'environ 8‰ mesurée ici correspond à l'altitude de Courtemaîche (~400 m). Un bassin versant au-dessus de 500 mètres peut être, selon lui, définitivement exclu.

La concentration totale en strontium apparaît particulièrement élevée pour l'environnement calcaire de la région. Selon M. Kramers du Laboratoire de géologie isotopique de l'Université de Berne, elle est proche de celle d'une saumure.

Le rapport isotopique ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr dans une eau reflète, quant à lui, le même rapport existant dans la roche constitutive de l'aquifère. Sachant que ce rapport a varié au cours du temps dans les carbonates marins, il représente donc un intéressant paramètre d'identification de la roche réservoir. La valeur mesurée à Courtemaîche se répète à plusieurs reprises, notamment durant le Créta-

Isotope	Unité	Valeur
Tritium ³ H	[UT]	≤ 1.6
Oxygène-18 δ ¹⁸ O	[‰]	-7.92 ± 0.04
Strontium total	[ppm]	23.26
rapport ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	[-]	0.707372 ± 0.00002
Radium ²²⁶ Ra	[mBq/l]	160 ± 30
Uranium ²³⁴ U	[mBq/l]	28 ± 6
²³⁸ U	[mBq/l]	< 10

Tab. 3: Résultats des analyses isotopiques de l'échantillon d'eau prélevé le 22 août 2000 à la Basse Fin

cé (à 87, 93, 108, 117 et 133 Ma), au cours du Lias (à 195 Ma), ainsi qu'au passage Permien-Trias. Nous pouvons d'emblée écarter le Crétacé, inexistant en Ajoie. Restent donc les formations géologiques antérieures au Dogger, sans qu'il soit possible de préciser laquelle. Il est néanmoins intéressant de noter que le rapport isotopique du strontium (ainsi que sa concentration totale) mesuré à la Basse Fin se rapproche des valeurs observées dans les forages profonds du Nord de la Suisse, dans l'aquifère du Muschelkalk (Matter et al., 1987).

La concentration en radium de notre échantillon est parmi les plus élevées de Suisse selon M. Surbeck du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Elle est comparable à celle de l'eau minérale «Arkina» exploitée par forage à Yverdon. Certaines eaux thermo-minérales françaises ont également une teneur très significative en radium-226.

La concentration totale en uranium est faible, inférieure à 1.5 µg/l. On observe par ailleurs un fort déséquilibre entre les deux isotopes analysés (234U et 238U), déséquilibre caractéristique de l'éloignement important d'un gisement (granite).

3. Conclusions

Les différents résultats acquis à Courtemâche permettent de caractériser l'aquifère du Dogger calcaire et les eaux souterraines qu'il abrite de la manière suivante (valable à l'échelle de la région ajoulote):

- C'est un aquifère karstique captif (ou artésien non jaillissant), vraisemblablement sans zone de battement.
- Il est isolé de la surface par des formations géologiques aquicludes, dont en particulier les marnes de l'Oxfordien s.s.
- Son étendue est importante (pluri-kilométrique) et la ressource hydrogéologique, en terme de volume, est conséquente.
- C'est un aquifère peu à très peu fracturé en dehors des accidents tectoniques régionaux liés au graben du Rhin.

- Son réseau karstique est vraisemblablement peu développé.
- Les écoulements naturels et vitesses de circulation des eaux souterraines y sont faibles.
- Les eaux souterraines sont saumâtres (très fortement minéralisées), riches en chlorure de sodium principalement.
- Elles sont anciennes, âgées entre 50 et 2000 ans environ.
- Elles ont une origine profonde (Trias ?) et remontent, à travers l'écran très faiblement perméable des marnes aaléniennes, jusque dans le Dogger calcaire par le biais des accidents tectoniques majeurs affectant l'ensemble de la série sédimentaire du Jura tabulaire.
- Elles se mélangent aux eaux déjà présentes en faible quantité dans le Dogger ou en acquièrent certains traits au cours de leur séjour.

Certaines des caractéristiques décrites ci-dessus demeurent toutefois des hypothèses.

Du point de vue de l'alimentation en eau potable, l'aquifère du Dogger sur territoire ajoulot ne peut plus être envisagé comme une ressource potentielle pour assurer l'alimentation des générations futures. Le caractère saumâtre des eaux souterraines qu'il contient limite très sérieusement les possibilités d'exploitation, tout en accentuant fortement les coûts (mise en oeuvre de techniques de désalinisation des eaux, mise en place d'équipements non corrosifs, etc.). En l'état actuel de la technique, tout projet dans ce sens doit être malheureusement remis en cause. Cette restriction s'étend au Dogger du Jura tabulaire (Ajoie et territoire de Belfort notamment) mais ne concerne ni les Franches-Montagnes, ni le district de Delémont dont les contextes géologiques et hydrogéologiques sont totalement différents (voir respectivement (Hessenauer et al., 2001) et (Flury et al., 1989)).

La démonstration a en revanche été faite de l'existence d'un certain potentiel géother-

mique en Ajoie. C'est donc dans cette direction que pourraient s'orienter les éventuels projets d'exploitation de l'aquifère du Dogger. Il faut néanmoins savoir que les eaux chaudes captées devraient, en raison de leur salinité, nécessairement être réinjectées dans l'aquifère d'origine par l'intermédiaire d'un doublet.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement le Maître d'ouvrage, le Département de l'Environnement et de l'Équipement du Canton du Jura, représenté par le Service des Ponts et Chaussées, M. J.-Ph. Chollet, Ingénieur cantonal, ainsi que ses collaborateurs.

Bibliographie

- Flury, F. & Wexsteen, P. 1989: Recherche d'eau par forage en rocher calcaire. Exemple des forages implantés dans la Grande Oolithe (Dogger) à Delémont-Bellerive (JU). Société jurassienne d'émulation. Extrait des Actes, 59 p.
- Géologie-Géophysique 1999: Etude par sismique réflexion haute résolution de la région de Courtemaîche en Ajoie. République et canton du Jura, Service des ponts et chaussées, Section route nationale. Rapport, 45 p. (inédit).
- Hessenauer, M., Rieben, C. & Flury, F. 2001: Prospection d'eau souterraine par forages profonds à Muriaux (canton du Jura). Bull. Géol. Appl. 6/2, déc. 2001.
- Matter, A., Peters, T. & Ramseyer, K. 1987: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Verhältnisse und Sr-Gehalte von Tiefengrundwässern, Mineralien sowie Gesteinen aus dem Kristallin und der Trias der Nordschweiz. *Eclogae geol. Helv.* 80/2, 579-592.
- MFR Géologie-Géotechnique SA 1998: A16 – Section 2 : Boncourt–Porrentruy-Ouest. Projet définitif: km 0.200–13.603. EIE-Impact sur les eaux souterraines. Département de l'environnement et de l'équipement, Service des ponts et chaussées, Section route nationale, Delémont. Rapport d'impact, 89 p. (inédit).
- MFR Géologie-Géotechnique SA 2001a: A16 Section 2 – Forages profonds à Courtemaîche. Phase I – Projet d'exécution. République et canton du Jura, Service des ponts et chaussées, Section route nationale. Rapport technique, 29 p. (inédit).
- MFR Géologie-Géotechnique SA 2001b: A16 Section 2 – Forages profonds à Courtemaîche. Phase II – Exécution des forages. République et canton du Jura, Service des ponts et chaussées, Section route nationale. Rapport technique, 28 p. (inédit).
- Motor Columbus AG (1981): Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern. Hydrogeologie Laufental. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern. Rapport, 159 p.
- Olive, Ph., Hubert, P. & Ravailleau, S. 1995: La datation des eaux souterraines par le tritium. Cours postgrade EPFL, 15 p. (inédit).
- Rieben, C. 1999: Recherche d'eau à 666,6 m de profondeur. *Revue GWA* 7/99. Tiré à part, 7 p.
- Schmidt, C., Braun, L., Paltzer, G., Mühlberg, M., Christ, P. & Jacob, F. 1924: Die Bohrungen von Buix bei Pruntrut und Allschwil bei Basel. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, X. Lieferung, 74 p.
- Stober, I., Richter, A., Brost, E. & Bucher, K. 1999: The Ohlsbach Plume – Discharge of deep saline water from the crystalline basement of the Black Forest, Germany. *Hydrogeology Journal* 07/3, p. 273-283.
- Vuataz, F.-D., Gusset, R., Rodriguez, A. & Schönborn, G. 1999: Forage géothermique F5 à Yverdon-les-Bains. Office fédéral de l'énergie, Programme Géothermie. Rapport final.