Prospection d'eau souterraine par forages profonds à Muriaux (Canton du Jura)

Autor(en): **Hessenauer, M. / Rieben, C. / Flury, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **6 (2001)**

Heft 2

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-222974

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bull. Géol. appl.	vol. 6	no. 2	p. 147 – 164	Décembre 2001

Prospection d'eau souterraine par forages profonds à Muriaux (Canton du Jura)

avec 9 figures et 1 tableau

M. HESSENAUER[1)], CH. RIEBEN[2)] & F. FLURY[1)]

Résumé

Une prospection des eaux souterraines profondes du plateau des Franches-Montagnes a été réalisée entre 1995 et 2000 dans la région de Saignelégier (Canton du Jura). Elle a débouché sur l'exécution, en 1999 et 2000, de deux forages de reconnaissance sur la commune de Muriaux. Ces deux ouvrages, réalisés en méthode destructive en circulation inverse, ont atteint respectivement 615 et 635 m de profondeur. Ils ont apporté de nouvelles connaissances sur le modèle hydrogéologique du secteur étudié et ont mis en valeur le réservoir karstique contenu dans l'aquifère des calcaires du Dogger. Les débits ont pu être testés jusqu'à un maximum de 70 m^3/h, mais les débits critiques ont été atteints dans les deux ouvrages, à 40–45 m^3/h pour FM1 et 20–25 m^3/h pour FM2. Les analyses chimiques ont clairement démontré une signature chimique particulière des eaux pompées, conséquence vraisemblable d'un mélange d'eau avec une composante jeune et superficielle (Malm) et une composante ancienne plus profonde et autochtone (Dogger).

Zusammenfassung

Zwischen 1995 und 2000 wurde eine Untersuchung des tieferen Grundwassers der Freiberger Ebene in der Gegend von Saignelégier (Kanton Jura) durchgeführt. Anschliessend wurden im Jahre 1999 und 2000 zwei Probebohrungen in der Gemeinde von Muriaux realisiert. Bei diesen je 615 und 635 tiefen Bohrungen wurde die destruktive Umkehrspülungsmethode angewendet. Sie erbrachten neue Erkenntnisse über das hydrogeologische Modell des untersuchten Sektors insbesondere über den wichtigsten Karstaquifer des Doggers. Die Förderraten konnten bis zu einem Maximum von 70 m^3/h getestet werden, aber die kritischen Förderraten wurden bei beiden Bohrungen mit 40–45 m^3/h für FM1 und mit 20–25 m^3/h für FM2 erreicht. Die chemischen Analysen haben deutlich eine spezielle chemische Zusammensetzung der gepumpten Wasser gezeigt, was ziemlich sicher auf einer Mischung von jüngerem, oberflächlichem Grundwasser (Malm) mit älterem, tieferem und autochthonem Grundwasser (Dogger) zurückzuführen ist.

Abstract

A groundwater exploration campaign was carried out between 1995 and 2000 in the Franches-Montagnes plateau near Saignelégier (NW Switzerland). This resulted in two deep survey wells being drilled in Muriaux, a village in the Canton of Jura. The wells were drilled using destructive, inversed fluid circulation techniques and attained depths of 615 and 635 meters respectively. Thanks to those wells, new information has come to light on the plateau's hydrogeological model and the value of the karstic (limestone) Dogger aquifer has been highlighted. Flow levels were tested to a maximum of 70 m^3/h but critical flowrates were found to be 40–45 m^3/h for the first well and 20–25 m^3/h for the second well. Groundwater chemistry has shown a particular chemical composition which is a likely consequence of a mixture of a younger, superficial Malm water and an older, deeper, autochthonous Dogger water.

* MFR Géologie-Géotechnique SA, Rue de Chaux 9, 2800 Delémont
** MFR Géologie-Géotechnique SA, Rue Franche 24, 2500 Bienne 3

1. Introduction

1.1 Cadre du projet

En 1995, le Syndicat pour l'alimentation des Franches-Montagnes en eau potable (SEF) entame une étude de mise en valeur des ressources en eaux souterraines du plateau calcaire des Franches-Montagnes (Figure 1). Ce Syndicat, créé en 1939, regroupe actuellement 27 unités de distribution (21 communes et 6 regroupements de communes) disséminées sur les cantons du Jura et de Berne.

Les objectifs pratiques de cette démarche consistent à trouver une troisième ressource en eau potable, en complément des deux ressources actuellement exploitées par le Syndicat : trois puits en nappe alluviale à Cortébert (captés en 1940) et la source karstique du Torrent à Cormoret (captée en 1970), les deux situées dans le vallon de St-Imier (Figure 2). Cette troisième ressource s'avère nécessaire en cas de mise hors-service de l'une des deux ressources existantes (pollution accidentelle, panne de pompes, mise hors-service pour révision, etc.) et devrait couvrir le tiers, voire la moitié des besoins en eau, soit 2000 à 2500 m^3/j.

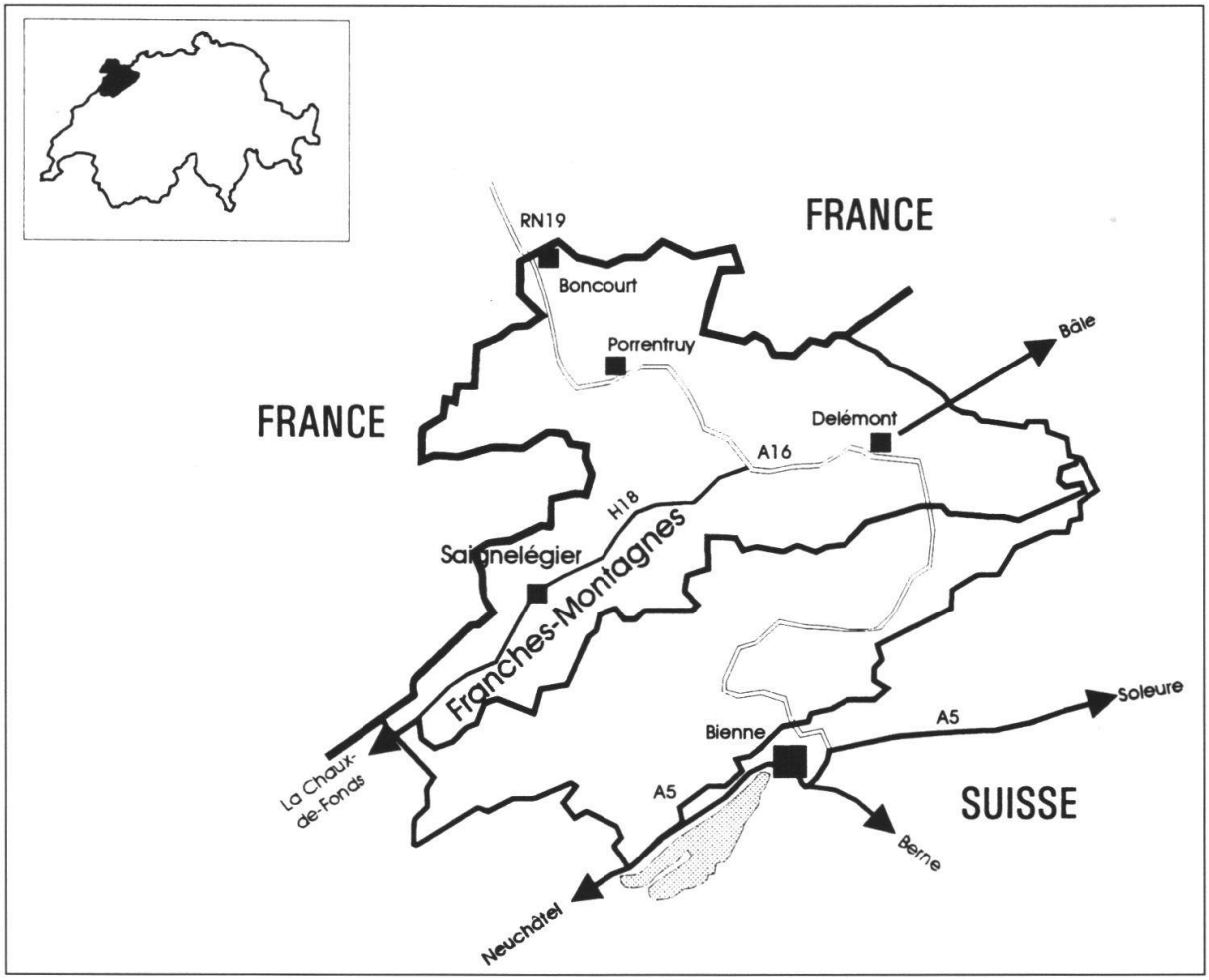


Fig. 1: Localisation du secteur d'étude.

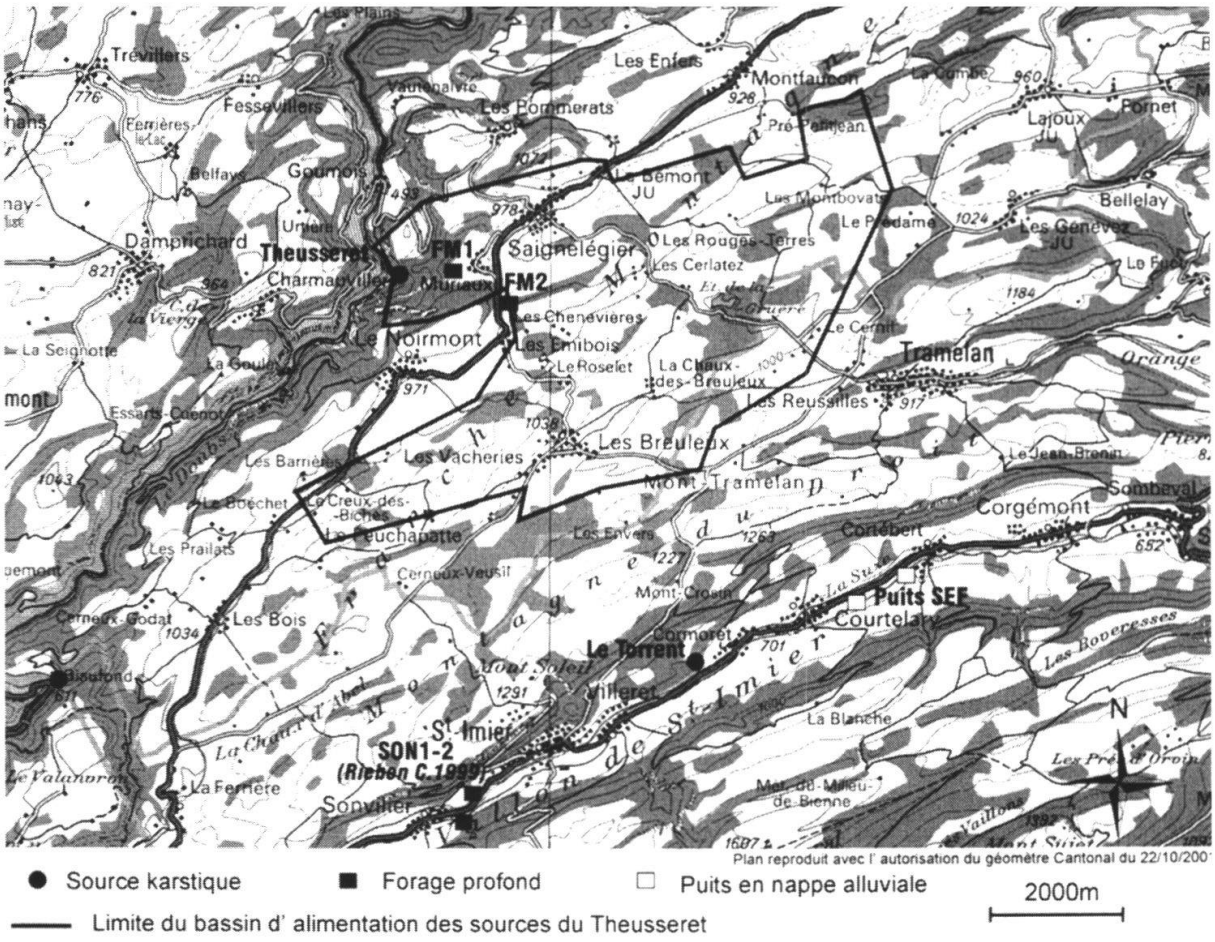


Fig. 2: Situation générale du projet et localisation des forages de reconnaissance.

Le projet de recherche d'eau souterraine et la réalisation des forages profonds dans les Franches-Montagnes en 1999 et 2000, sont l'aboutissement d'une démarche prospective en plusieurs étapes, chacune marquée par des travaux et des études de terrain différents :

- synthèse de l'état des connaissances (MFR 1995) ;
- 1er multitraçage (MFR 1996, Rieben 2000) ;
- campagne de sismique-réflexion (MFR 1997) ;
- 2ème multitraçage, implantation des sites (MFR 1998).

Le financement du projet de forage, devisé à Fr. 1'830'000.— T.T.C, a été assuré par un partenariat entre :

- l'Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et de la Protection de la nature (OFEFP) à hauteur de 39 %;
- par les cantons du Jura et de Berne, respectivement à hauteur de 16.775 % et 13.725 %;
- par le SEF lui-même pour la part restante.

1.2 Rappel géologique et hydrogéologique

La région des Franches-Montagnes forme un plateau faiblement ondulé, qui occupe une surface d'environ 300 km^2 et dont l'altitude moyenne avoisine 1000 m.

Du point de vue géologique le soubassement rocheux des Franches-Montagnes est constitué essentiellement par une alternance de niveaux calcaires et de niveaux

marneux, le tout présentant une structure plissée en anticlinaux succédant à des synclinaux (Suter H. 1936). Dans les horizons calcaires, on définit deux ensembles bien distincts :

- les calcaires du Malm (~ 300 m d'épaisseur), qui constituent la majeure partie des affleurements rocheux visibles en surface;
- les calcaires du Dogger (~ 200 m d'épaisseur), qui apparaissent en surface surtout lors de culmination axiale des anticlinaux.

Les calcaires du Malm et ceux du Dogger constituent les horizons préférentiels de circulation des eaux souterraines (= aquifères).

Les sources du Theusseret (500 m.s.m), au fond de la vallée du Doubs en amont de Goumois (Figure 2), constituent l'exutoire d'eau souterraine le plus important de la région. Leur bassin versant est assimilable à un éventail largement ouvert vers l'Est, le centre et l'Ouest des Franches-Montagnes, couvrant un territoire s'étendant approximativement de Montfaucon au Peuchapatte, soit une superficie d'environ 60 km^2.

Les sources du Theusseret ont ceci de particulier qu'elles émergent des calcaires du Malm appartenant à unité géologique tabulaire dite «inférieure». Cette série est surmontée par une unité géologique plissée dite «supérieure» composée également de calcaires du Malm, mais aussi du Dogger. Le plan de chevauchement dénommé Gipou (Suter 1976, 1981) est le responsable de ce redoublement des couches (Figure 3).

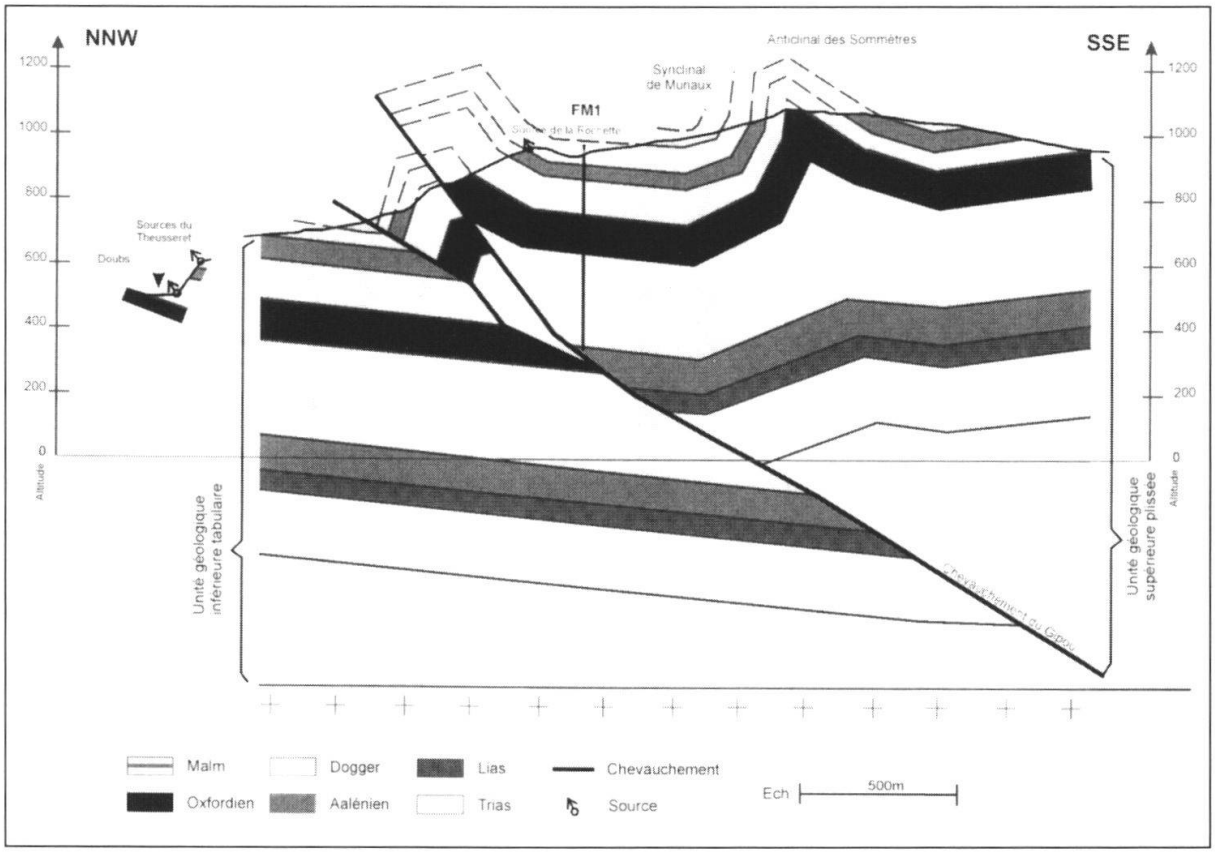


Fig. 3: Coupe géologique passant par FM1.

1.3 Contraintes techniques particulières

L'originalité de cette prospection réside dans l'épaisseur importante de la zone non-saturée et le caractère non-captif de la nappe, contrairement à des explorations précédentes dans le Jura plissé (Flury et al. 1991, Rieben 1999).

En effet, l'altitude moyenne des Franches-Montagnes est d'environ 1000 m. Le niveau de base du drainage régional des eaux, c'est-à-dire le Doubs, se situe quant à lui légèrement au-dessus de 500 m d'altitude. La présence d'un réservoir aquifère exploitable n'est donc possible qu'en dessous de cette cote, d'où la grande profondeur des forages à réaliser.

Cette configuration induit deux contraintes techniques très importantes:

- le massif rocheux risque d'être totalement sec et fracturé jusque vers 500 m de profondeur. En cas de forage conventionnel à l'eau, les pertes de fluide en cours de foration risquent donc d'être très conséquentes;
- en cas de découverte d'eau souterraine, le diamètre du forage doit être suffisant pour implanter une pompe à grande profondeur.

2. Execution des forages

2.1 Le projet

Le projet comportait l'exécution de deux forages destructifs, tubés et cimentés jusqu'à la base des marnes de l'Oxfordien vers 400 m de profondeur environ, puis équipés d'une colonne inox crépinée dans la zone de production du trou. L'objectif de ces deux forages était de recouper un maximum de fissures karstifiées potentiellement aquifères dans les formations du Malm moyen (Séquanien-Rauracien) et du Dogger. L'équipement de pompage était dimensionné de façon à fournir un débit minimum de pompage de 30 m^3/h pour une hauteur de refoulement de 650 m maximum.

Finalement, à l'exécution, ces deux ouvrages ont atteint 615 m (FM1) et 635 m (FM2) de profondeur et ont confirmé partiellement le modèle géologique prévu. Les objectifs hydrogéologiques ont, quant à eux, été atteints avec succès. Les options techniques choisies sont décrites dans le tableau 1.

2.2 Les travaux de forage

Avec l'exécution des deux ouvrages, ce sont au total 1250 mètres qui ont été forés en technique destructive (marteau fond de trou et rotary). Les travaux de foration,

Profondeur FM1/FM2	Formation géologique	Ø de forage	Equipement
0–100 m	Malm moyen	24"	Casing 21" cimenté
100–400/355 m	Malm inf. et Dogger sup.	20"	Casing 16" cimenté
400/355–615/635 m	Dogger	$12^1/_4$"	Colonne inox $9^5/_8$" sans massif filtrant

Tab. 1: Diamètres de forage et équipements.

d'équipement et les différents tests hydrauliques ont eu lieu de mi-juillet 1999 à début février 2000 pour le forage FM1 (à l'Ouest de Muriaux) et de début octobre 1999 à mi-mai 2000 pour le forage FM2 (entre Muriaux et les Emibois).

L'originalité de la technique employée, et particulièrement adaptée à ce projet, reposait sur la circulation du fluide de forage. En effet, que ce soit avec le marteau fond de trou ou en rotary, la circulation du fluide de forage (généralement l'air comprimé) a été de type inverse : l'air sous pression est injecté à l'intérieur de l'espace annulaire des tiges à doubles parois et remonte les cuttings par l'intérieur de ces mêmes tiges.

Les avantages découlant de cette technique particulière de forage à l'air, en circulation inverse, au marteau fond de trou ou en rotary sont diverses:

- une information géologique précise et quasi-instantanée. Les cuttings recueillis tous les mètres à la sortie du forage proviennent, à grande vitesse, du seul fond de trou et sont de taille centimétrique à pluri-centimétrique. Il n'y a pas, en particulier, de mélange avec des cuttings provenant de l'érosion des parois du trou, au cours de la remontée;
- une information géologique continue (taux de récupération des cuttings = 100%). La traversée des zones fissurées, fracturées, karstifiées, se traduit, en méthode conventionnelle (circulation à l'air directe) par des pertes partielles ou totales du fluide de circulation. Au contraire, en circulation inverse, la remontée des cuttings par le train de tiges élimine les pertes de fluide et de cuttings et les risques associés tels que le colmatage et la pollution éventuelle des aquifères ou le coincement de la garniture;
- en matière d'hydraulique souterraine, les forages réalisés en circulation inverse ont l'avantage de pouvoir individualiser les arrivées d'eau successives. On peut ainsi, dans le cas d'arrivées d'eau à contraste chimique marqué, en identifier les caractéristiques physico-chimiques respectives et leur importance relative;
- une utilisation minime d'eau comme fluide de foration;
- la possibilité, en première approche, de tester l'aquifère grâce au système air-lift mis en place sur la colonne de forage en fond de trou.

2.2.1 Forage FM1

La profondeur atteinte du premier ouvrage est de 615 m (333 m.s.m). Les différentes étapes chronologiques sont synthétisées dans la figure 4. Le trou a été tubé et cimenté dans la partie non saturée jusqu'à 400 m de profondeur, dans les calcaires massifs de la Grande Oolithe (Hauptrogenstein).

Une fois la phase de foration terminée, le trou a été nettoyé par air-lift, puis il a fait l'objet d'un développement par injection d'acide chlorhydrique à 20 % à 484 m de profondeur. La mise en place, à partir de 392 m de profondeur, de la colonne de captage en inox $9^5/_8$ soudée (sans massif filtrant) après acidification n'a pas été facile et la reprise du forage au tricône a été nécessaire pendant quelques jours afin de dégager le trou de toutes ses retombées post-acidification.

Les prévisions géologiques prévoyaient la possibilité d'un redoublement des formations du Malm calcaire, sous les marnes de l'Oxfordien et les calcaires du Dogger, avec le passage d'un chevauchement majeur (chevauchement du Gipou). Or, ce dernier n'a pas été intersecté et le forage FM1 a traversé la succession normale

des formations du Malm et du Dogger, depuis le Séquanien supérieur au sommet, jusqu'aux marnes de l'Aalénien à la base (Figure 3).

Les premières venues d'eau ayant été observées vers 486 m, elles correspondent à des zones de fractures dans l'imposante série calcaire de la Grande Oolithe du Dogger. Au-dessus de cette cote, aucun signe de fracturation importante n'a été relevé, que ce soit par l'observation des cuttings ou par les indications du foreur. Vers 524 m, une zone difficile a été traversée : elle peut être imputable à une zone de fracturation, mais ne se confirme pas sur les cuttings.

2.2.2 Forage FM2

La profondeur atteinte du deuxième ouvrage est de 635 m (315 m.s.m). Les différentes étapes chronologiques sont synthétisées dans la figure 4. Le trou a été tubé et cimenté jusqu'à 355 m de profondeur, dans les niveaux marneux du Callovien, masquant ainsi la première venue d'eau dans les calcaires du Rauracien à 70 m de profondeur.

A la différence du premier forage, la foration a été rendue difficile et lente par la présence d'eau et de terrains instables à la base des marnes de l'Oxfordien (282 m de profondeur) et dans les marnes du Callovien (de 356 à 378 m).

Après la réalisation d'une diagraphie sur le forage (profil conductivité et température), différentes phases de développement du trou par injection d'acide chlorhydrique ont été entreprises à 3 profondeurs différentes : 371 m, 432 m et 464 m. Des tests de pompage à l'air-lift après chaque phase ont permis d'observer les différents gains obtenus au bout de chaque cycle d'acidification. En terme de volume pompé, le gain total au bout des 3 acidifications est de l'ordre de 33% par rapport à la situation initiale avant acidification (gain essentiellement réalisé lors de la 2ème acidification).

De la même manière que pour le forage FM1, le forage FM2 a traversé successivement toutes les formations du Malm et du Dogger, depuis le Séquanien supérieur au sommet, jusqu'aux marnes de l'Aalénien à la base. Le contexte géologique du site FM2 est donc identique à celui de FM1, même si quelques différences lithologiques sont notoires. En effet, le forage FM2 présente globalement des séries géologiques plus marneuses que FM1 (marnes de l'Oxfordien s. str. et du Callovien plus épaisses, faciès Grande Oolithe entrecoupé par un niveau marneux, Dogger à faciès plus marneux).

Les venues d'eau, repérées distinctement, proviennent de la base du Callovien marneux. Ces arrivées d'eau situées vers 382 m sont en charge sous cette série marneuse, puisque le niveau piézométrique, mesuré ultérieurement, se situe vers 300 m de profondeur à la base des marnes oxfordiennes.

Dans la série calcaire sous-jacente, des indices de fracturation ont pu être repérés sur les cuttings et plus particulièrement à la base du Bathonien inférieur et au sommet du Bajocien supérieur, soit de 435 à 490 m de profondeur. Lors de la foration, des passages vraisemblablement fracturés ont été «ressentis» vers 406, 508 et 570 m.

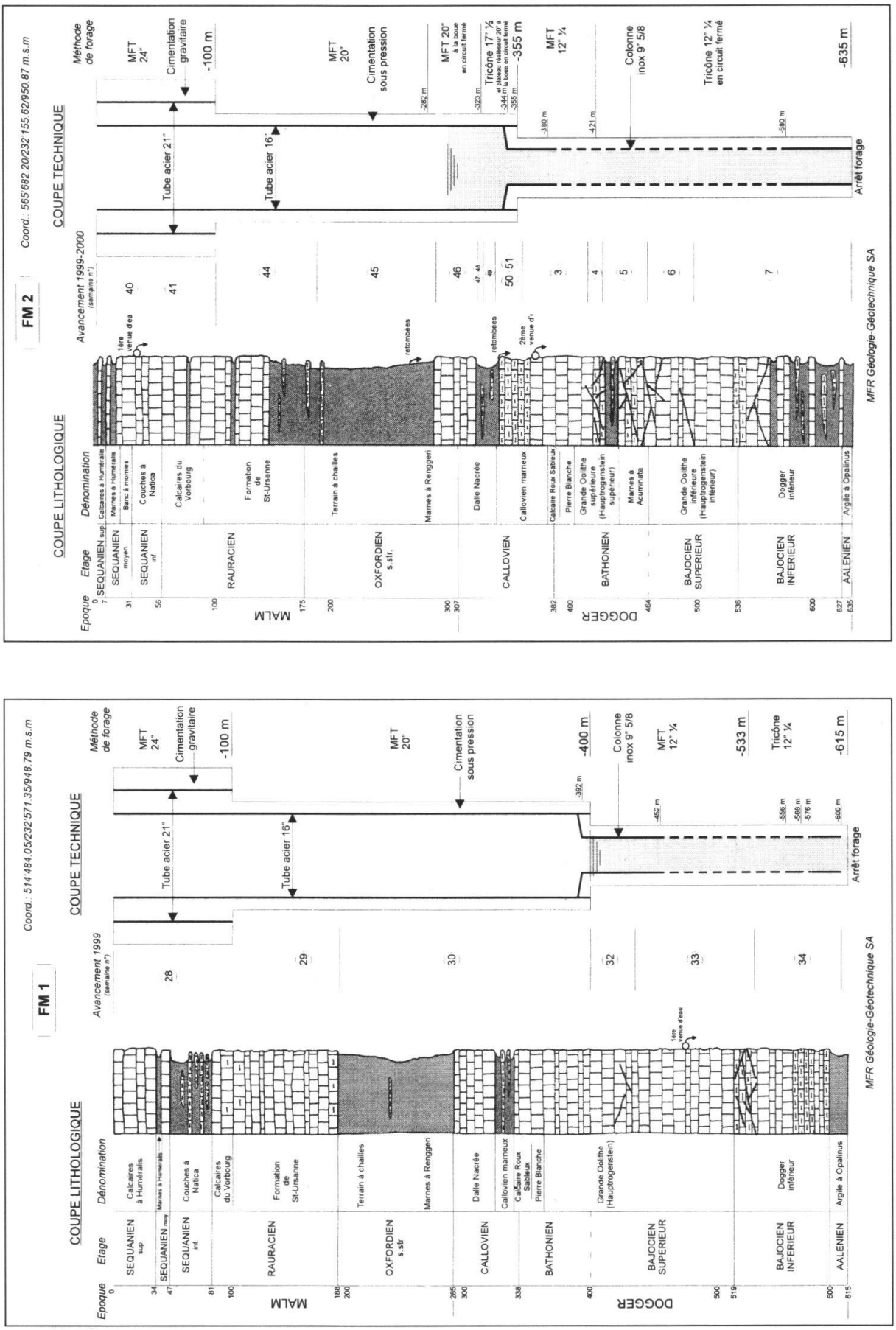


Fig. 4: Coupes lithologiques et techniques des forages FM1 et FM2.

2.3 Aspects quantitatifs

Deux types d'essai de pompage ont été exécutés sur chaque puits, soit un essai de courte durée par paliers croissants de débit et un essai de production de longue durée à débit constant.

La géométrie des deux forages et de leur équipement, ainsi que le niveau piézométrique situé à grande profondeur (de 300 à 400 m), ont nécessité la mise en place et l'emploi de deux pompes immergées électriques de 8" montées en série, la pompe amont étant placée dans une chambre de reprise de Ø=$10^3/4$". Ce dispositif permet d'obtenir des débits maximaux de l'ordre de 70 m^3/h. Le réglage des débits se fait par vannage en surface. Un orifice réalisé au sommet de la chambre de reprise permet d'assurer un débit de fuite, la pompe du bas tournant toujours à plein régime. Ce dispositif reste néanmoins très difficile à mettre en place et, dans les deux cas, de nombreux problèmes ont été rencontrés avant les essais de pompage proprement dits.

2.3.1 Les essais de puits (Figure 5)

Les essais de pompage par paliers croissants de débit (ou essais de puits) ont pour but l'évaluation des paramètres hydrauliques des ouvrages (pertes de charge, débit critique). Ils permettent de tracer les courbes caractéristiques des puits et d'obtenir une première estimation des perméabilités.

Chaque ouvrage a été testé après acidification(s). L'efficacité réelle du développement n'a donc pas pu être contrôlée de manière précise sur ces ouvrages et en particulier sur FM1, le forage FM2 ayant tout de même fait l'objet de tests de pompage à l'air-lift (chap. 2.2.2).

Dans les deux cas, le débit critique des ouvrages a été atteint, soit entre 40 et 45 m^3/h pour FM1 et vers 25 m^3/h pour FM2. Les eaux sont restées turbides tout au long de ces essais de courtes durées, sans qu'aucune amélioration ne soit visible, ni appréciable à l'œil.

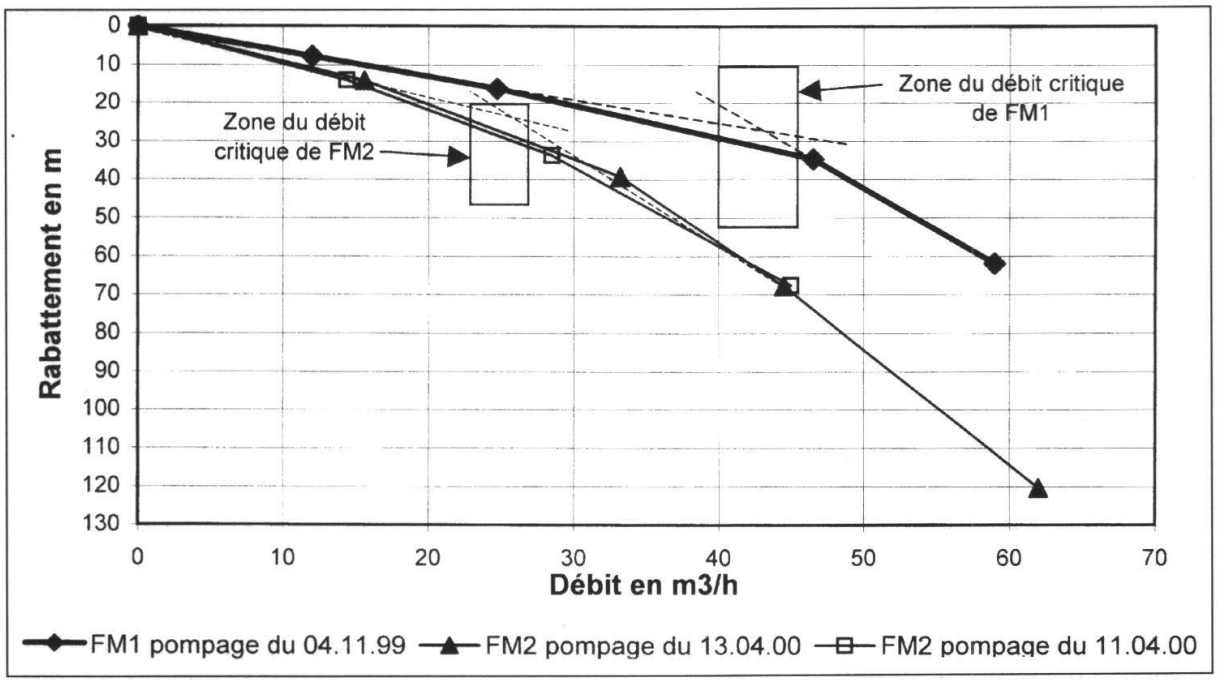


Fig. 5: Courbes caractéristiques des forages FM1 et FM2 à Muriaux.

Une première approximation de la perméabilité de l'aquifère a pu être faite au niveau de FM1 en utilisant une méthode en régime permanent (calcul de Dupuit et simplification de Porchet) et une méthode en régime transitoire (expression d'approximation logarithmique de Jacob) : les perméabilités calculées sont de l'ordre de 1.10^{-6} m/s.

Malgré une colonne d'eau plus importante dans FM2 que dans FM1 (niveau statique respectivement de 320 et 396 m) et la mise en œuvre d'un développement plus poussé dans FM2 (3 acidifications), ces essais de pompage de courte durée permettent déjà de démontrer que le forage FM2 présente des capacités de production et d'exploitation inférieures à celles de FM1.

2.3.2 Les essais de pompage longue durée

Forage FM1

Un premier essai longue durée a pu être effectué sur FM1 durant 22 jours dans des conditions d'étiage. Le débit, réglé dès le démarrage au maximum de la capacité des pompes (vanne totalement ouverte), a baissé régulièrement de plus de 60 m^3/h à 45 m^3/h en fin d'essai. Le rabattement final avoisinait 100 m (50 % de l'épaisseur de l'aquifère saturé), le niveau étant pseudo-stabilisé (baisse de 0.6 cm par heure). On peut considérer qu'à l'issue de ce pompage les eaux étaient claires.

Un dizaine de semaines plus tard, un deuxième essai de pompage dans ce même puits a pu être mis en œuvre durant 15 jours (Figure 6). Le débit final atteint était identique au premier essai soit 45 m^3/h. Par contre, le rabattement final était voisin de 80 m (40 % de l'épaisseur de l'aquifère saturé). Il faut cependant noter que d'importants épisodes pluvieux, associés à une fonte des neiges, ont engendré une hausse notoire du niveau piézométrique en cours de pompage et ultérieurement une stabilisation du niveau à 476 m de profondeur ainsi qu'un apport d'eaux turbides. Cet événement indique qu'il peut y avoir transfert d'eau depuis la surface jusqu'à l'aquifère capté et/ou que la hausse du niveau piézométrique résulte d'une transmission de pression par le principe des «vases communicants», l'aquifère étant considéré comme un réseau de conduits interconnectés. En outre, cet événement marque le caractère non confiné de l'aquifère capté par le forage et le définit comme un système vraisemblablement lié avec les circulations régionales.

Forage FM2

La mise œuvre d'un pompage longue durée dans FM2 a par contre été moins aisée et s'est trouvée confrontée à bon nombre de problèmes. Un essai longue durée a pu tout de même être débuté à un débit de 30 m^3/h (Figures 7 et 8). Deux vannages ont été cependant nécessaires afin d'obtenir une stabilisation du niveau dynamique. Au final, le débit de pompage était de 18 m^3/h et le rabattement de l'ordre de 125 m (50 % de l'épaisseur de l'aquifère saturé). Ce pompage n'a pas pu être poursuivi en longue durée, le moteur de la pompe du haut ayant chauffé et grillé. La turbidité des eaux pompées, très importante au démarrage de l'essai, s'est sensiblement améliorée au cours du pompage sans pour autant aboutir à des eaux claires.

Les paramètres hydrodynamiques

Pour interpréter les résultats des pompages, nous avons opté pour la méthode des écoulements transitoires avec représentations sur graphes semi-logarithmiques, di-

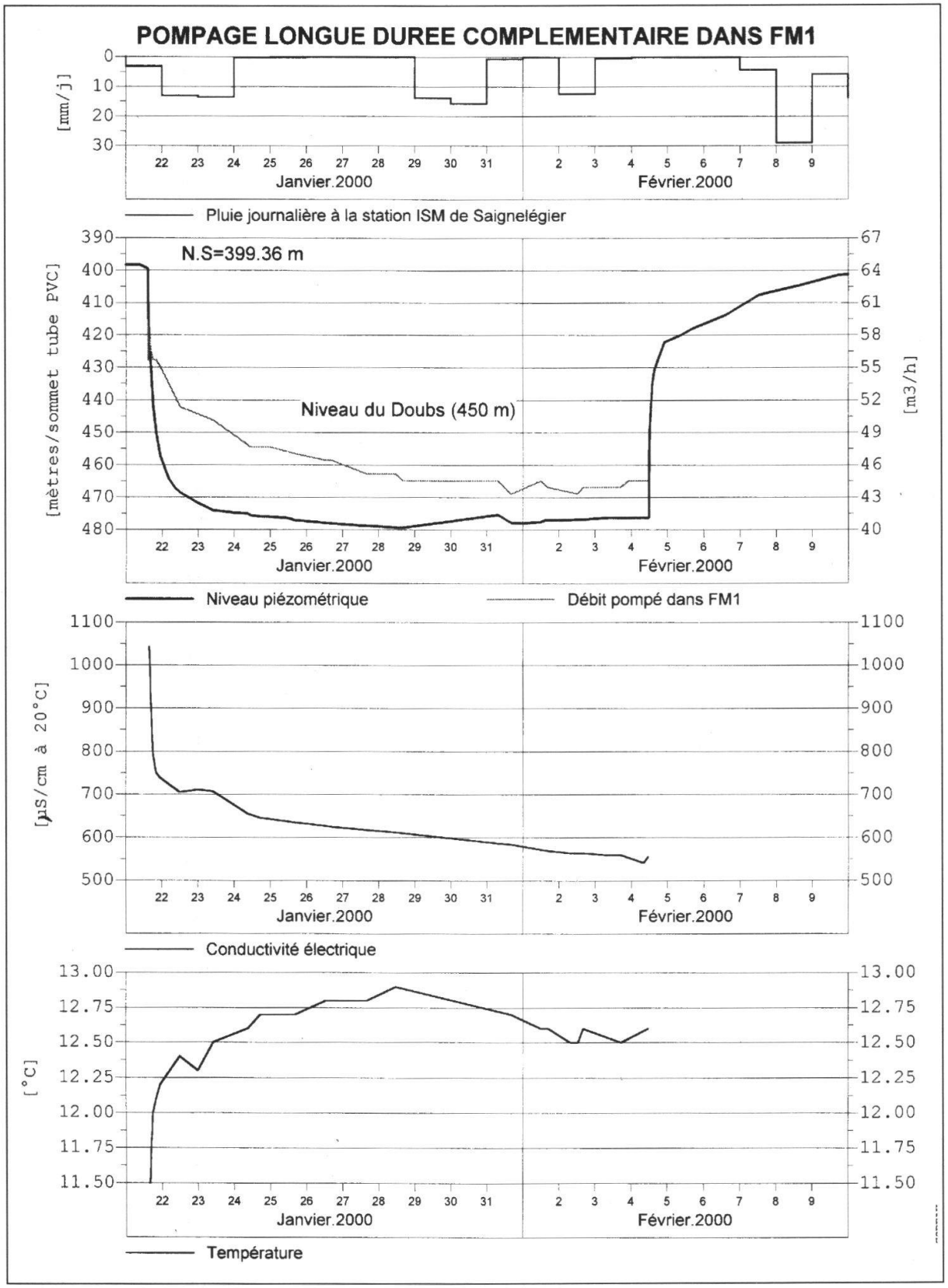


Fig. 6: Pompage longue durée complémentaire dans FM1.

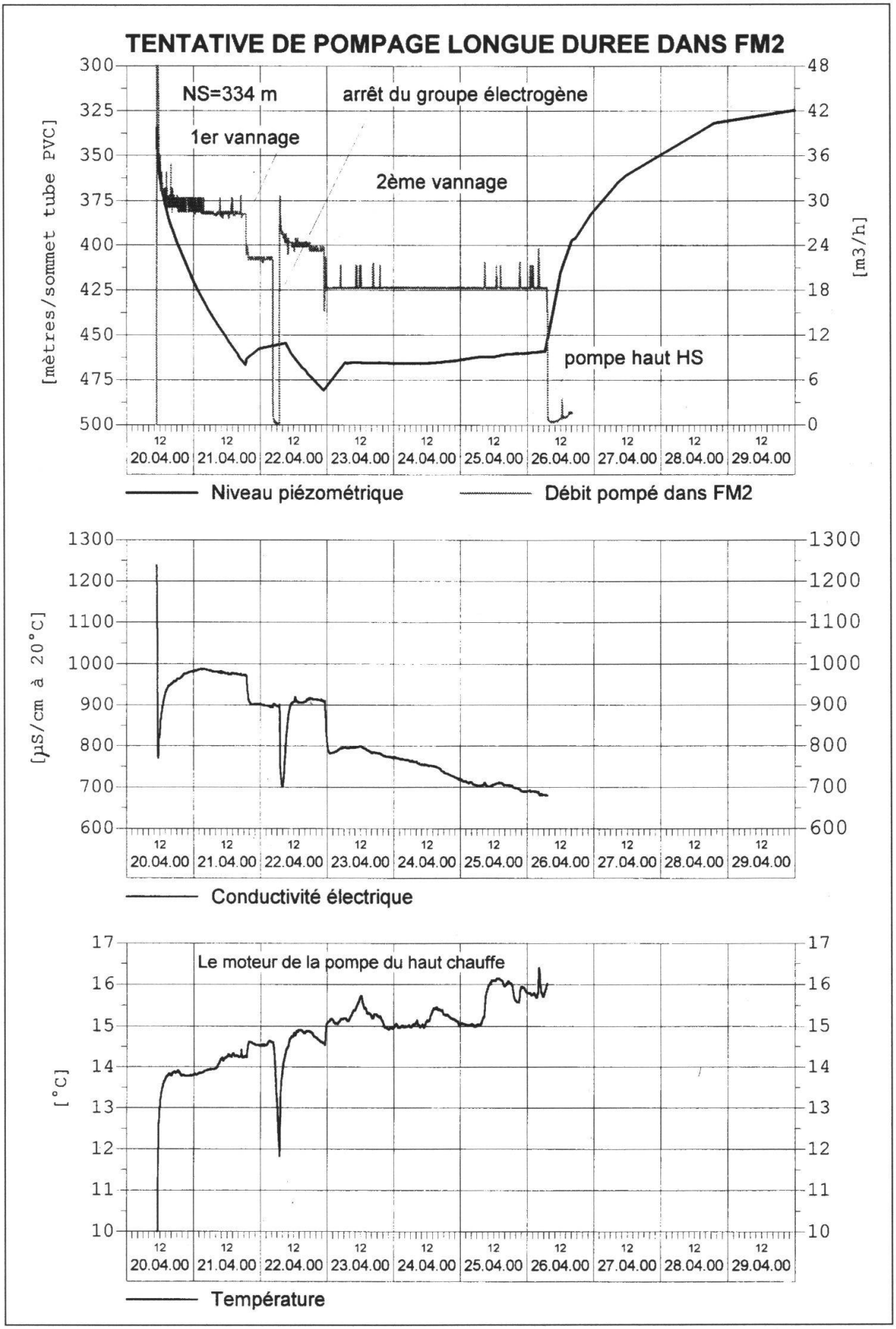


Fig. 7: Tentative de pompage longue durée dans FM2.

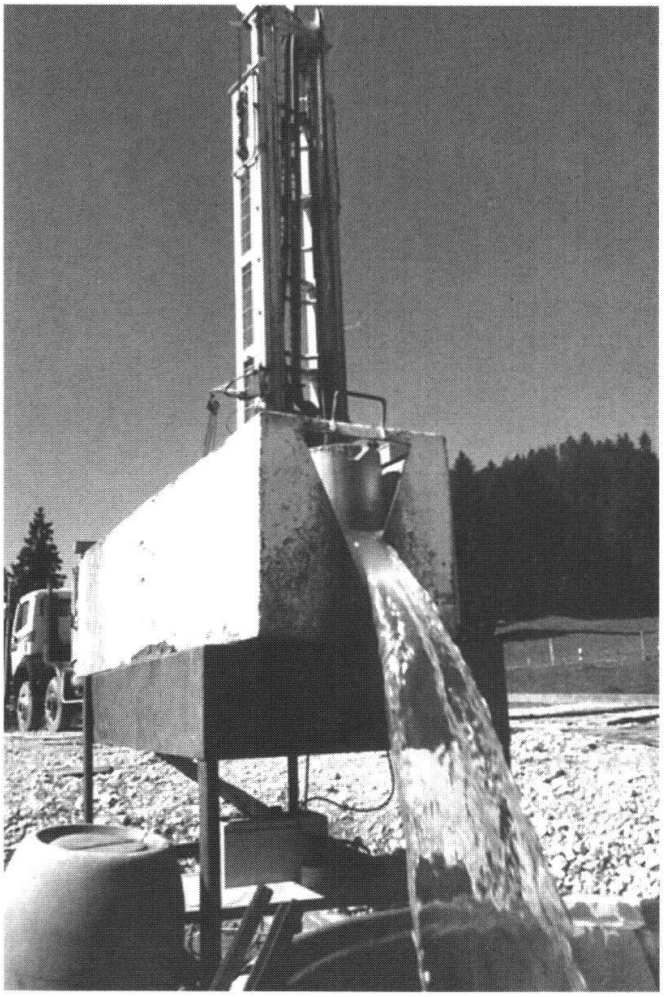


Fig. 8: Pompage dans FM2.

te méthode de l'approximation logarithmique de Jacob. En l'absence de piézomètres à proximité du puits, il n'est pas possible de calculer directement le coefficient d'emmagasinement et la valeur moyenne de perméabilité illustre la perméabilité de l'aquifère à proximité immédiate du forage.

En ce qui concerne FM1, les perméabilités obtenues en descente et en remontée correspondent bien et sont de l'ordre de 5.10^{-7} m/s. Avec les données obtenues lors du pompage par paliers, sensiblement plus «optimistes», on obtient une plage de perméabilité autour du forage FM1 de 5.10^{-7} à 1.10^{-6} m/s. Bien que relativement faibles, si on les compare à un aquifère graveleux, ces perméabilités peuvent être considérées comme bonnes pour un milieu karstique. Elles représentent une valeur moyenne pour un aquifère de 200 m d'épaisseur. En réalité, les zones productives totalisent vraisemblablement moins de 100 m dans l'ouvrage.

En ce qui concerne FM2, la courbe de descente, entrecoupée de phases de vannage, ainsi que la courbe de remontée de cet essai, ne permettent pas de calculer une approximation de la perméabilité de l'aquifère.

Par contre, la courbe de remontée d'une première tentative de pompage longue durée a permis de la calculer sommairement, par la méthode de l'approximation logarithmique de Jacob. Avec une épaisseur d'aquifère saturé voisine de 250 m, elle est de l'ordre de 5.10^{-8} m/s, soit plus de dix fois inférieure à celle obtenue dans FM1, confirmant ainsi les résultats moins réjouissants acquis dans ce deuxième forage.

2.3.3 Relations entre les deux forages et la source du Moulin du Theusseret

A l'origine de la réalisation des forages profonds, le modèle hydrogéologique prévisionnel envisageait le recoupement, en profondeur, de l'aquifère karstique alimentant les sources du Theusseret. En effet, ces sources constituent la principale résurgence de la région. Leur bassin d'alimentation, suite aux différents essais de traçage, est évalué à environ 60 km^2 et couvre un territoire s'étendant approximativement de Montfaucon au Peuchapatte (Figure 2).
En l'absence de mesures directes, tel un essai de traçage depuis les forages par exemple, des mesures indirectes (acidification des puits et essais de pompage avec observations des chroniques de débit et de conductivité dans l'exutoire principal du Theusseret) n'ont pas démontré de relation hydraulique tangible entre les forages FM1 et FM2 situés respectivement à 1000 m et 2300 m de la source du Theusseret.

2.3.4 Interaction entre les deux forages

Les deux forages sont distants de 1275 m et sont situés à la même altitude (≅ 950 m.s.m). Les niveaux piézométriques moyens dans FM1 et FM2 étant respectivement à 400 et 300 m de profondeur, le gradient hydraulique entre les deux forages est égal à 7.8 %. Même si, dans le cas d'un aquifère karstique, il est difficile de parler de gradient hydraulique, le toit de la nappe n'étant pas modélisable, un tel paramètre est tout de même important et souligne la différence de comportement hydrodynamique entre ces deux ouvrages.
Cette différence se marque également dans le comportement totalement indépendant des deux forages : lors des différents pompages dans FM2, aucune influence ne se marque sur les niveaux piézométriques dans FM1.
Le contexte géologique comparable, ainsi que le type chimique similaire d'eau souterraine captée (cf. chap. 2.4), montrent que FM1 et FM2 captent vraisemblablement un même système hydrogéologique.

2.4 Aspects qualitatifs

2.4.1 Potabilité de la ressource

Les différentes analyses d'échantillons d'eau prélevés en cours et fin de pompage ont clairement démontré une signature chimique particulière des eaux pompées dans FM1 et FM2. Ainsi, ces eaux karstiques profondes se démarquent des eaux bicarbonatées calciques des sources karstiques avoisinantes par leur composante complémentaire essentiellement sodique et chlorurée, mais aussi sulfatée et magnésienne (Figure 9).

Ces éléments minéraux restent cependant tout à fait conformes aux limites de qualité des eaux de boisson actuellement en vigueur (Office fédéral de la santé publique 1991), en particulier au forage FM1, et leur variabilité tend à être encore vérifiée lors de pompages complémentaires.

Les teneurs très faibles, voire insignifiantes, des eaux pompées en nitrates, carbone organique (DOC), l'absence de micropolluants d'origine industrielle et agricole, mettent en évidence, d'une part, ses qualités pour l'alimentation en eau potable et, d'autre part, une excellente protection contre les influences anthropiques.

Seuls quelques paramètres, sous réserve d'analyses et de pompages complémen-

		Source du Theusseret	Forage FM1				Forage FM2		Exigences légales	
Paramètres	Unités	22.11.99	16.11.99	29.11.99	24.01.00	04.02.00	29.02.00	11.05.00	Col.I	Col. II
			1)	2)	1)	2)*	3)	4)		
pH		7.2	7.64	7.26	7.57	7.55	-	-	7-8	9.2
Température	[°C]	-	13.0	12.9	12.7	12.6	12.6	-	8-15	25
Conductivité (20°)	[mS/cm]	505	700	603	645	540	717	-		
Oxygène dissous	[mg/l]	-	-	9.4	6.15	8.04	-	> 50	< 0.5	1
Saturation en oxygène	[%]	-	-	105	65	84	-	686		
Turbidité (25 °C)	FTU	2.5	> 50	5.5	8.5	-	-	-		
Couleur eau filtrée	CPU	4.6	1.5	5.4	-	-	-	-		
Oxydabilité (KMnO4)	[mg/l]	1.6	2.3	1.3	-	2.7	-	1.7	< 3	6
DOC	[mg/l]	1.8	0.5	0.4	-	-	-	0.4	< 1	
TOC	[mg/l]	1.8	0.7	0.4	-	-	-	0.5		
Indice phénol	[mg/l]	< 0.01	< 0.01	< 0.01	-	-	-	< 0.01		
Dureté carbonatée	[°f]	25.9	20.4	21.1	-	21.4	-	27.3		
Dureté totale	[°f]	26.1	20.5	18.7	-	19.3	19.6	32.4	15-25	
Bicarbonate	[mg/l]	316	249	257	-	261	300	333		
Calcium	[mg/l]	100.4	55.8	50.4	-	54.9	56.4	99.7	40-125	
Magnésium	[mg/l]	2.4	16.1	14.9	-	13.6	13.4	18.27	5-30	50
Sodium	[mg/l]	2.2	81.2	62.9	65.7	54.3	76.6	67.87	< 20	150
Potassium	[mg/l]	1.5	4.2	3.9	-	3.9	3.6	2.87	< 10	
Ammonium	[mg/l]	0.008	0.42	0.35	0.43	0.34	0.24	0.253	< 0.05	0.5
Nitrite	[mg/l]	0.004	0.007	0.1	0.008	0.007	0.066	0.01	< 0.01	0.1
Nitrate	[mg/l]	9.2	< 0.1	0.6	0.4	1.4	< 0.1	< 0.1	< 25	40
Chlorure	[mg/l]	4.5	101	66.2	75.5	50.2	56.5	131	< 20	200
Fluorures	[mg/l]	< 0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	1.9	1.1		1.5
Sulfate	[mg/l]	5.4	38	33	33.1	27.9	43	28.8	10-50	200
Manganèse	[mg/l]	< 0.2	0.008	0.005	-	0.005	0.008	0.047	< 0.02	0.05
Manganèse dissous	[mg/l]	0.06	0.02	0.01	-	0.01	-	0.03	< 0.02	
Fer total	[mg/l]	< 0.001	0.026	0.002	-	0.052	< 0.002	0.721	< 0.05	0.3
Fe2 dissous	[mg/l]	0.011	0.012	0.052	-	0.18	-	< 0.01	< 0.05	
Aluminium	[mg/l]	0.092	0.1	0.055	-	0.05	-	0.78	< 0.05	0.2
Bore	[mg/l]	< 0.01	0.1	0.115	0.118	0.113	0.179	0.2		
Phosphate	[mg/l]	0.13	0.02	0.02	-	0.02	0.07	<0.01	< 0.05	
Phosphore total	[mg/l]	0.05	0.03	0.03	-	0.11	-	0.14		
Chrome total	[µg/l]	2.1	< 1	< 1	-	2	-	3	< 1	
Nickel	[µg/l]	< 1	< 1	< 1	-	3	-	9		
Cuivre	[µg/l]	< 1	< 1	< 1	-	5	-	5	< 50	1500
Zinc	[µg/l]	< 1	< 1	1.8	-	4	-	34	< 100	5000
Cadmium	[µg/l]	< 0.5	< 0.5	< 0.5	-	< 0.5	-	< 0.5	< 0.5	5
Plomb	[µg/l]	< 5	< 5	< 5	-	< 5	-	< 5	< 1	50
Mercure	[µg/l]	< 0.5	< 0.5	< 0.5	-	< 1	-	1.4	< 0.1	1
Arsenic	[µg/l]	< 2	< 2	< 2	-	5	6	3	< 2	50
Sélénium	[µg/l]	< 2	< 2	< 2	-	< 2.5	-	< 2.5	< 1	10
Silicate	[mg/l]	3.3	8.7	8	-	7.2	7.1	8.3		
Sulfures	[mg/l]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	-	< 0.1	-	< 0.1		
Cyanure libre	[µg/l]	< 5	< 5	< 5	-	< 5	-	< 5		50
Trichloréthylène	[µg/l]	0.6	-	< 0.1	-	-	-	< 0.1	1	25
Perchloréthylène	[µg/l]	0.2	-	< 0.1	-	-	-	< 0.1		
HPA	[ng/l]	-	-	< 10	-	-	-	< 10		200
Pesticides	[ng/l]	-	-	< seuil	-	-	-	< seuil		500/tot
Tritium	TU	-	-	6.8	-	-	-	3.8		
Oxygène 18	‰	-	-	-10.63	-	-	-	-10.49		
Strontium	ppm	-	-	2.65	-	-	-	4.29		
87Sr/86Sr		-	-	0.707357	-	-	-	0.707346		
Germes aérobies	[nb/ml]	600	410	110	-	1000	-	> 2500		100 (300)
E. coli	[nb/100ml]	32	3	3	-	25	-	0		0
Entérocoques	[nb/100ml]	9	0	0	-	15	-	0		0

1) Début pompage longue durée 2) Fin pompage longue durée 3) Avant acidification 4) Pompage de simulation d'exploitation discontinu * pluie+fonte des neiges

Fig. 9: Récapitulatif des résultats d'analyses chimiques sur les eaux prélevées dans les forages profonds de Muriaux.

taires, indiquent une relative sensibilité de l'aquifère profond capté aux pollutions «naturelles» de type karstique: turbidité, présence de germes d'origine fécale.

En outre, l'anomalie thermique notoire des eaux pompées à une telle profondeur, inférieure à 14°C, constitue un élément favorable pour l'exploitation de ces ouvrages et l'alimentation en eau potable du SEF.

Ces premiers résultats qualitatifs, recueillis en phase de prospection, montrent toutefois que, d'ores et déjà, un traitement simple (aération – coagulation – double filtration – désinfection) des eaux pompées au forage FM1 sera nécessaire pour les paramètres suivants : ammonium, turbidité et bactériologie.

2.4.2 Analyses isotopiques

Des analyses isotopiques ont pu être réalisées sur des prélèvements d'eau effectués dans les deux forages (Figure 9).

Les teneurs en tritium dans FM1 s'expliquent vraisemblablement (en éliminant une contamination industrielle de surface), par un mélange à moitié d'eau jeune (moins de 5 ans) et à moitié d'eau ancienne (plus de 50 ans, avec infiltration des eaux avant les premiers essais thermonucléaires atmosphériques entre 1950 et 1960). Les teneurs en tritium dans FM2 sont sensiblement plus faibles que dans FM1 et, de ce fait, démontrent une part plus grande des eaux anciennes dans le mélange des eaux pompées.

L'analyse de l'oxygène-18, quasi-identique dans FM1 et FM2, indique, quant à elle, que l'altitude moyenne du bassin versant des eaux pompées se situerait entre 1100 m et 1300 m, altitudes non présentes dans l'environnement proche des deux forages.

Les teneurs du strontium dans les eaux pompées dans FM1 et FM2 sont classiques pour l'environnement calcaire de la région. Le rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$, de 0.70735, est identique pour les 2 forages. Il correspond à des eaux ayant circulé dans des terrains calcaires du Jurassique, le Crétacé étant absent de la région. Par ce rapport, l'influence des terrains sous-jacents triasiques n'est donc pas sensible (Faure 1986). Il exprime ainsi un mélange entre des eaux issues des calcaires du Malm et du Dogger, sans qu'aucun rapport précis entre les deux puisse être établi précisément.

Ces analyses isotopiques montrent donc que les eaux pompées dans FM1 et FM2 proviennent vraisemblablement d'un mélange d'eau avec une composante jeune et plus superficielle (Malm) et une composante ancienne plus profonde (Dogger).

De tels résultats nécessiteront confirmation à long terme, l'aquifère capté ayant pu faire l'objet de contamination par les fluides de forage et par l'injection d'acide non totalement éliminés à l'issue des tests hydrauliques de la phase de prospection.

3. Les ressources et les perspectives d'exploitation

L'aquifère capté par les forages constitue bien un réservoir aquifère, mais difficilement quantifiable quant à son «stock» exploitable. L'analyse des isotopes (tritium et strontium), la surveillance des fluctuations du niveau piézométrique en fonction des conditions météorologiques ainsi que l'observation de la remontée des niveaux

d'eau à la fin des tests de pompage sont autant d'éléments en faveur d'une recharge effective de ce «stock».
Seules les données acquises lors des pompages d'essai permettent d'envisager l'exploitabilité de cette ressource. Dès lors, il en ressort que:

- l'exploitation du forage FM1, à un débit permanent de 40 à 45 m^3/h, est envisageable. L'estimation d'un rabattement à long terme n'excédant pas 80 m nous semble tout à fait raisonnable et correspondrait à un rabattement maximum admissible (40 % de l'aquifère saturé). Un tel débit fournirait un volume de l'ordre de 1'000 m^3 par jour. Cette valeur nous paraît être minimale, dans la mesure où un développement supplémentaire de l'ouvrage doit être possible (acidification, polyphosphates).
  Des tests complémentaires devraient être réalisés pour déterminer si ce débit devra être extrait par pompage continu ou par pompage intermittent, ce qui permettrait aussi de contrôler l'adéquation pompage intermittent / teneur en matières en suspension.
- l'exploitation du forage FM2 à un débit permanent de 20 à 25 m^3/h paraît également envisageable. De la même manière que pour FM1, le rabattement maximum admissible ne devrait pas dépasser 40% de l'aquifère saturé, soit environ 100 m. Un tel débit fournirait un volume de l'ordre de 500 m^3 par jour. Ici également, un développement supplémentaire de l'ouvrage dans sa partie inférieure serait possible pour améliorer sa productivité.

Un volume exploitable total de 1'500 m^3 par jour représente donc une estimation raisonnable de la ressource à long terme associée à ces deux forages, pour autant que l'absence d'interaction hydraulique observée durant les tests soit confirmée en régime d'exploitation simultanée.

Dans l'état actuel des choses, cette quantité permet de couvrir presque la moitié des besoins totaux du SEF en période de basse consommation.

En période de pointe, les 2 puits pourraient fournir au maximum 30% du débit total nécessaire. La couverture des besoins n'est donc pas suffisante en cas de mise hors-service de l'un ou l'autre des 2 autres points d'eau du vallon de St-Imier, le déficit à combler étant équivalent à la capacité de production du FM1 (1000 m^3/jour).

4. Conclusions

Le projet de recherche d'eau souterraine par forages profonds pour le Syndicat pour l'alimentation des Franches-Montagnes en eau potable (SEF) a été réalisé avec succès. Les deux puits forés, l'un à 615 m et l'autre à 635 m, se sont révélés tous deux positifs et ont pu être testés quantitativement et qualitativement.

Cette phase de prospection a prouvé la faisabilité d'un projet d'alimentation du SEF à partir des propres ressources en eau du plateau des Franches-Montagnes.
En l'état actuel des deux ouvrages, l'estimation des débits pouvant être pompés à long terme est de 1000 m^3 par jour au FM1 et 500 m^3 par jour au FM2, soit au total 1500 m^3 par jour, pour autant que l'absence d'interaction hydraulique observée durant les tests soit confirmée en régime d'exploitation simultanée.

La qualité chimique des eaux pompées reflète la particularité de l'aquifère découvert en profondeur. Outre une composition chimique classique pour le secteur de

type bicarbonaté calcique, elles portent en elles une signature singulière principalement chlorurée et sodique et secondairement sulfatée et magnésienne, propre à une composante d'origine profonde. Ces caractéristiques n'ont aucune influence sur la potabilité de l'eau. Les normes en matière de qualité d'eau de boisson sont largement respectées. Les différentes analyses ne révèlent aucun signe typique de pollution industrielle, urbaine ou agricole. Seul le caractère karstique de ces eaux se traduit épisodiquement par une turbidité élevée et la présence de germes d'origine fécale.

Les deux ouvrages réalisés ne permettent certes pas de couvrir totalement les besoins en eau potable souhaités par le SEF, mais ont occasionné la découverte d'une nouvelle ressource en eau. Sa gestion nécessitera une bonne connaissance de l'aquifère, de son bassin d'alimentation, de sa recharge et surtout de la préservation de sa protection. Ces données doivent encore faire l'objet d'investigations spécifiques.

La réalisation d'un 3ème puits permettrait, d'une part, de couvrir complètement les besoins du SEF en période de pointe de consommation et fournirait, d'autre part, la marge de sécurité nécessaire par rapport à une panne d'exploitation de l'un ou l'autre des 2 autres puits.

Remerciements

Cette étude a été financée par le Syndicat pour l'alimentation en eau potable des Franches-Montagnes (SEF) avec le soutien de la Confédération (OFEFP) et des cantons du Jura (OEPN) et de Berne (OEHE). Nous tenons particulièrement à remercier M. P.-A. Barthe, chef d'exploitation du SEF et M. G. della Valle, géologue cantonal du canton de Berne.

Bibliographie

FAURE, G. 1986: Principles of Isopote Geology, Second Edition. John Wiley & Sons, New York.

FLURY, F., ALLEMANN, R. & LACHAT, R. 1991: Recherche d'eau par forages dans l'aquifère profond du Malm à Delémont. - Résultats de la phase d'exploration. Gaz-Eaux-Eaux usées, SSIGE, Zurich, 12.1991, p. 841–849.

MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA 1995: Mise en valeur des ressources en eaux souterraines du plateau des Franches-Montagnes, Etape I. Rapport d'activités, SEF.

MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA 1996: Multitraçage dans la partie centrale des Franches-Montagnes. Résultats. SEF, PCH section route nationale.

MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA 1997: Mise en valeur des ressources en eau souterraine du plateau des Franches-Montagnes. Rapport final, SEF.

MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA 1998: Prospection d'eau souterraine à Muriaux. Etape II. Rapport technique, SEF.

OFFICE FÉDÉRAL DE LA SANTÉ PUBLIQUE 1991: Manuel suisse des denrées alimentaires, chap. 27A, 02.1991, suppl. 05.1994.

RIEBEN, C. 1999: Recherche d'eau à 666,6 m de profondeur. Gaz-Eaux-Eaux Usées, 79e année, 7/99, p. 593–599.

RIEBEN, C. 2000: Multitraçage dans la partie centrale des Franches-Montagnes, Jura, Suisse. Bulletin d'Hydrogéologie 18, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, p. 49–62.

SUTER, H. 1936: Geologische Beschreibung der Kartengebiete Les Bois und St-Imier im Berner Jura. Beitr. zur Geol. Karte der Schweiz, NF 72, 39 p.

SUTER, M. 1976: Tektonik des Doubstal und der Freiberge in der Umgebung von Saignelégier (Faltenjura). Eclogae geol. Helv., 69/3, 641–670.

SUTER, M. 1981: Strukturelles Querprofil durch den nordwestlichen Faltenjura, Mt. Terri-Randüberschiebung – Freiberge. Eclogae geol. Helv., 74/1, 255–275.