

Prospektion d'eau souterraine par forage profond incliné à Miécourt (Canton du Jura, Suisse)

Autor(en): **Hessenauser, M. / Flury, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **15 (2010)**

Heft 1

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-227475>

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.

Prospection d'eau souterraine par forage profond incliné à Miécourt (Canton du Jura, Suisse) M. Hessenauer¹, F. Flury¹

Mots clef: forage profond incliné, aquifère karstique, Malm, artésien, signature chimique.

Résumé

Une exploration des eaux souterraines profondes de la plaine au Sud-Est de l'Ajoie a été réalisée entre 2002 et 2009 dans la région de Miécourt (Canton du Jura). Après une première étape de prospection géophysique par sismique hybride, le projet s'est concrétisé par l'exécution, en 2008, d'un forage profond. Cet ouvrage, incliné de 35° par rapport à la verticale, a atteint une longueur forée de 565 m (450 m de profondeur verticale). Il a apporté de nouvelles connaissances sur le modèle hydrogéologique du secteur étudié et a mis en valeur le réservoir karstique contenu dans l'aquifère des calcaires du Malm. Le débit critique a atteint 300 l/min, alors que le débit artésien de l'ouvrage, de l'ordre de 100 l/min, a pu être suivi plusieurs mois après le chantier. Les analyses chimiques ont clairement démontré une signature chimique particulière des eaux pompées et leur qualité pour l'alimentation en eau potable, conséquence d'une excellente protection contre les influences anthropiques.

Summary

Deep groundwater investigations were carried out between 2002 and 2009 in south-east Ajoie in the plain around Miécourt (Canton of Jura). Following an initial phase of hybrid seismic geophysical prospection, the project came to fruition in 2008 when a deep bore hole was dug. The hole, at a 35° degree angle to the vertical axis, reached a bore length of 565 metres (vertical depth of 450 metres). It provided a new understanding of the hydrogeological characteristics of the investigation area and highlighted the karst reservoir in the Malm limestone aquifer. Critical flow reached 300 litres per minute, while the artesian flow of the bore hole – around 100 litres per minute – was monitored for several months after the investigation works were completed. Chemical analyses clearly showed that the water pumped out had a distinct chemical signature and could provide a quality supply of drinking water, due to its being well protected from anthropogenic influences.

1. Introduction

1.1 Cadre du projet

En 2002, le Syndicat des Eaux de la Vendline (SEV) entame une étude préliminaire (MFR 2002), visant à préciser la faisabilité d'une mise en valeur de l'aquifère profond du Malm dans le bassin tertiaire du Sud-Est de l'Ajoie (Fig. 1).

Ce Syndicat, qui assure la distribution en eau potable de sept communes, est actuellement alimenté par deux sources karstiques captées au milieu de villages. Dans l'optique

d'une diversification de ses apports et d'une diminution des risques de pollution de son approvisionnement, le SEV a souhaité réaliser cette prospection par forage profond. En outre, l'objectif pratique de cette démarche était de remplacer un des points d'eau exploités, la source de la Golatte dont le débit moyen est de l'ordre de 450 l/min.

Dans la région explorée comprise entre les villages de Cornol, Alle, Miécourt, Charmoille et Fregiécourt, le but était également d'améliorer les connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le bassin tertiaire en général et sur l'aquifère profond des calcaires du Malm en particulier.

Le projet s'est déroulé en deux phases successives dont la première (MFR 2007) a

¹ MFR Géologie-Géotechnique SA, rue de Chaux 9, CH-2800 Delémont 1
[marc.hessenauer@mfr.ch, francois.flury@mfr.ch]

consisté en une prospection géophysique afin de déterminer le site d'implantation de l'ouvrage et concevoir son dimensionnement. La seconde phase s'est concrétisée par l'élaboration d'un programme complet de forage et son exécution, ainsi que la synthèse des résultats de reconnaissance (MFR 2009).

1.2 Contexte géologique

Le secteur prospecté appartient au domaine du Jura tabulaire d'Ajoie et se situe entre le Jura plissé au Sud et le fossé rhénan au Nord (Fig. 2). Il correspond à un «bassin» dont l'assise est constituée de calcaires karstifiés du Jurassique supérieur (Malm), disposés en couches horizontales et protégés de la surface par des sédiments d'âge tertiaire («Molasse») pouvant atteindre une épaisseur maximale de l'ordre de 200 m (Diebold et al. 1963, Becker & Civelli 2002)(Tab. 1). La lithostratigraphie des formations affleu-

rantes sur le pourtour de ce bassin s'étend du «Kimméridgien» au «Rauracien» (Malm). Elle est caractérisée par une succession d'importantes séries calcaires plus ou moins karstifiées entrecoupées par des niveaux marneux moins importants et représente l'horizon-cible du projet (aquifère).

La puissante série marneuse de l'Oxfordien s. s., située à la base du Malm, constitue un horizon-repère (aquiclude) pour justifier l'arrêt du projet de forage.

Le Dogger, quant à lui, se situe sous les marnes oxfordiennes et se caractérise par des formations essentiellement calcaires (Callovien, Bathonien, Bajocien).

Au centre du bassin, les formations affleurantes sont constituées par:

- une couverture superficielle quaternaire: alluvions, colluvions, limons et loess;
- d'importants dépôts tertiaires (Plio-Miocène et Oligocène): sables fins, marnes micacées, argiles, grès.

Sur le plan régional, la fracturation est mar-

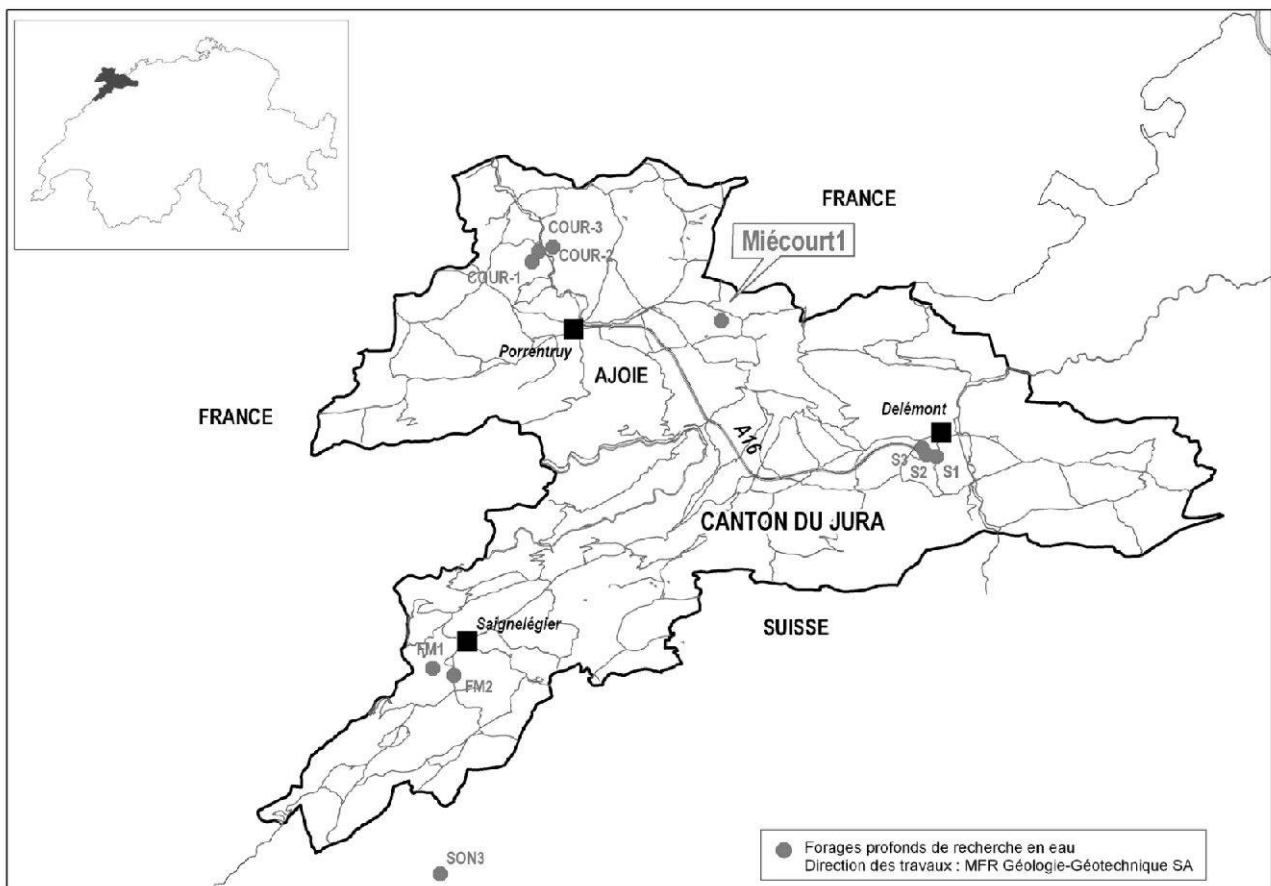


Fig. 1: Situation générale du projet.

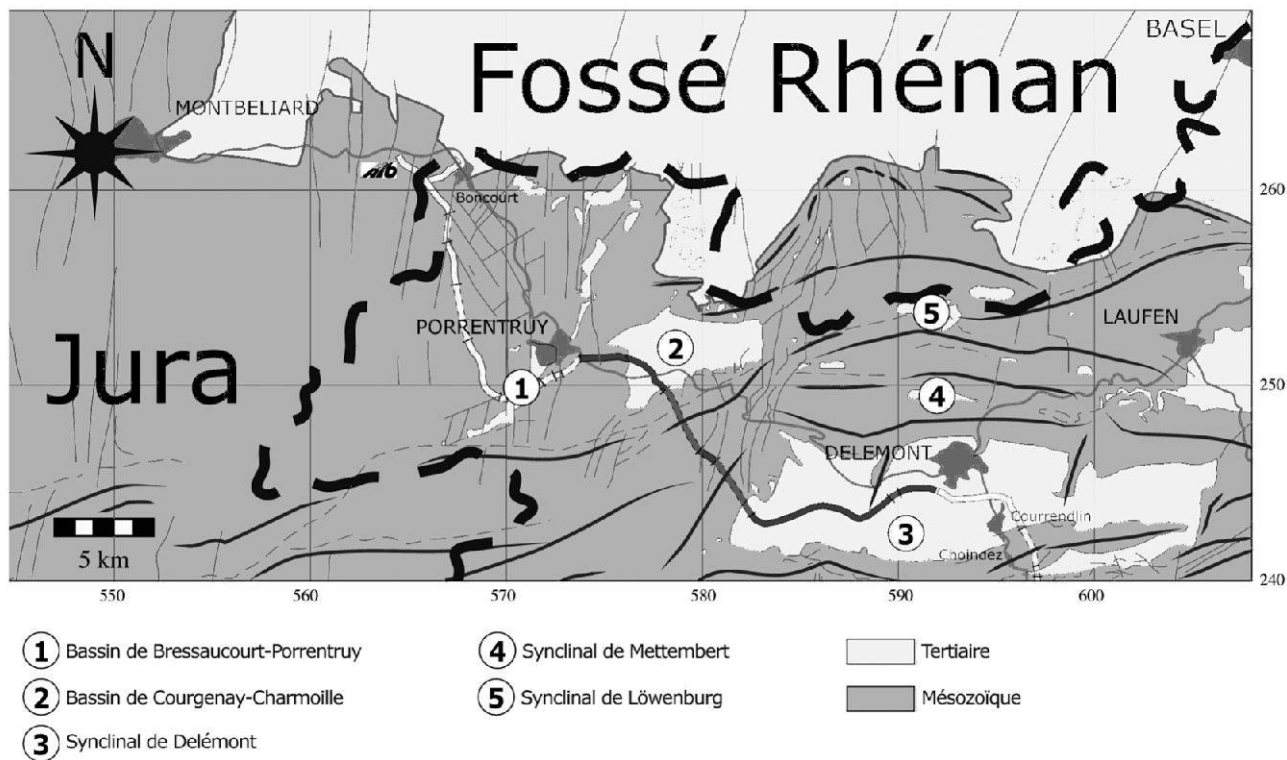


Fig. 2: Situation géologique générale du Canton du Jura (districts de Porrentruy et Delémont) et localisation des synclinaux à remplissage tertiaire.

Chronostratigraphie		Formation	Lithologie	Epaisseur		
Quaternaire	Holocène		Matériaux meubles, alluvions, colluvions, limons et loess	0 à quelques mètres		
	Pléistocène					
Cénozoïque	Plio-Miocène	Tortonien	OSM	0 à ~ 200 m		
	Oligocène	Chattien	USM			
		Rupélien	UMM			
Mésozoïque	Malm (Jurassique supérieur)	Kimméridgien	«Portlandien»? «Kimméridgien»	Reuchenette Courgenay Vellerat St-Ursanne	Calcaires, marno-calcaires, marnes	~ 300 m
		Oxfordien s.l.	«Séquanien» «Rauracien»			
		Oxfordien s.s.	Bärschwil	Marnes localement gonflantes	~ 100 m	
		Dogger (Jurassique moyen)	Callovien Bathonien Bajocien	Calcaires avec passages marneux possibles	~ 250 m	

Tab. 1: Description sommaire des formations géologiques du secteur d'étude.

quée par un réseau de failles de direction N-S (méridiennes), N060 et N150. Parmi ces trois familles principales de fractures, les accidents verticaux d'orientation sub-méridienne («rhénans», car liés au graben du Rhin situé au Nord) prédominent et induisent un modelé caractéristique formé d'une succession de horsts et de grabens (structure en «touches de piano»).

1.3 Contexte hydrogéologique

Sur le secteur d'étude situé à l'Est de l'Ajoie, l'aquifère profond du Malm calcaire est isolé de la surface par les formations à dominante imperméable de la «Molasse» tertiaire et limité à la base par l'aquiclude des marnes oxfordiennes (Grétilat 1996).

Le niveau de décharge de cet aquifère étant probablement représenté par les sources karstiques localisées en bordure du «bassin», l'aquifère profond du Malm correspond théoriquement à une nappe captive sous pression (artésianisme envisagé).

Les zones de recharge, quant à elles, correspondent aux affleurements de calcaires situés sur les pourtours du bassin.

Lors d'opérations de forages profonds ces dernières années, les formations calcaires du Malm se sont révélées productives dans des structures géologiques similaires à celles de ce bassin Tertiaire (Flury et al. 1991, Rieben 1999, MFR 2008).

Par contre, il n'en est pas de même avec l'aquifère des calcaires du Dogger, situé sous les marnes oxfordiennes. Une tentative d'exploration de cet aquifère captif a eu lieu lors des forages profonds de Courtemaîche au Nord-Ouest de l'Ajoie (Boem et al. 2006): les teneurs élevées en sels dissous (> 10 g/l) sont dissuasives pour tout projet de captage en vue d'une alimentation en eau potable.

1.4 Stratégie de prospection

Initialement, la démarche envisageait l'exécution de trois forages verticaux. Mais au

final, pour des questions de subventionnement, les moyens mis à disposition pour atteindre les buts fixés par la prospection hydrogéologique ont été la réalisation d'un seul forage de reconnaissance incliné.

Dans le Jura tabulaire d'Ajoie, les accidents géologiques sur lesquels les karsts ont pu se développer sont verticaux (Tschopp 1960). Ces accidents géologiques karstifiés constituent les cibles de toute recherche d'eau dans ce type d'aquifère, car il s'agit de zones à haute perméabilité.

A Courtemaîche, projet situé également dans le Jura tabulaire d'Ajoie, les deux premiers forages verticaux, pourtant implantés sur des anomalies géophysiques, se sont révélés non productifs. Par contre, le 3^{ème} forage, incliné entre 35° et 60°, a permis de recouper une importante venue d'eau.

L'expérience de Courtemaîche a démontré la pertinence d'effectuer un forage incliné afin de recouper un maximum de discontinuités verticales, particulièrement pour un projet d'exploration hydrogéologique.

Cette stratégie de prospection a donc été établie pour le SEV partant du postulat: «dans le contexte géologique concerné, la probabilité de recouper des accidents géologiques potentiellement productifs en eau est plus importante dans le cas d'un forage incliné que pour un forage vertical».

1.5 Site de forage retenu

La campagne de prospection par sismique hybride a été réalisée par la société spécialisée GeoExpert SA de Schwerzenbach (ZH) du 12.09. au 21.09.2006. La réalisation de cinq profils sismiques et leur interprétation a permis de définir un site préférentiel d'implantation du projet de forage (Fig. 3).

Ce choix s'est porté sur la limite occidentale d'un graben repéré par la géophysique (Fig. 4). Cette structure effondrée d'allongement méridien est délimitée à l'Ouest par une faille majeure (NS-1) – de type normal et d'un rejet de l'ordre de 30 m – et plusieurs accidents verticaux annexes rapprochés

(Fig. 5), qui sont autant de sites favorables à la circulation des eaux souterraines. De plus, dans le secteur choisi, ces accidents méridiens sont intersectés perpendiculairement par une faille (EW-2).

Il en découle donc une implantation optimale et ciblée du forage de reconnaissance avec les caractéristiques prévisionnelles suivantes:

- nom du forage: Miécourt 1;
- inclinaison dès le départ: 35° par rapport à la verticale;
- azimut: 240° N;
- longueur: 580 m;
- profondeur verticale à atteindre: 470 m.

2. Exécution du forage Miécourt 1

Les travaux de forage ont été exécutés par la maison spécialisée FORALITH Bohrtechnik AG à St. Gallen (SG).

Le chantier a démarré le 29.05.08 avec la mise en place des installations de chantier. Les travaux de foration proprement dits ont débuté le 03.06.08 pour se terminer le 04.08.08 à une longueur forée de 565 m et une profondeur verticale de l'ordre de 450 m.

Au final, les options techniques choisies sont décrites dans le tableau 2.

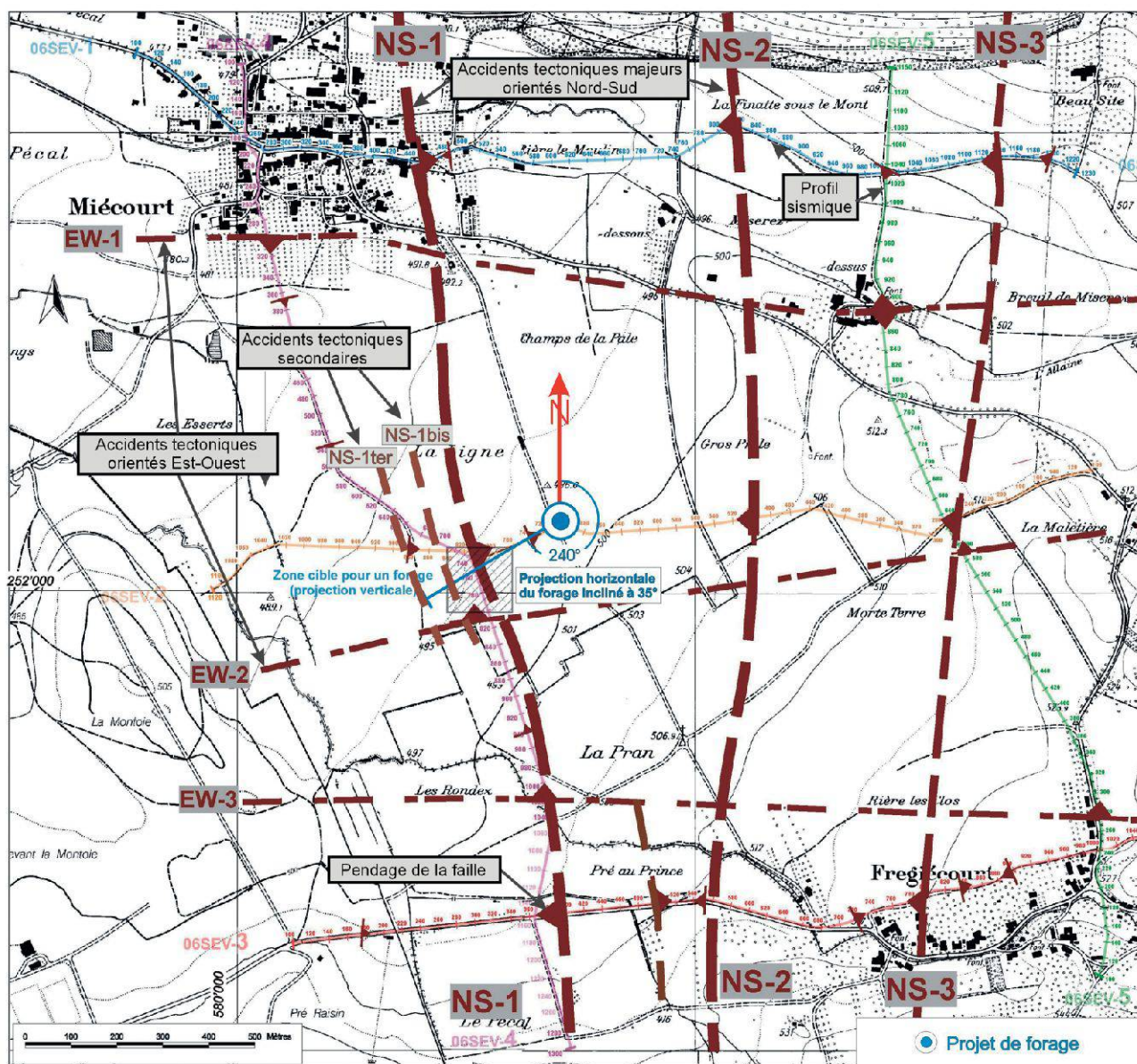


Fig. 3: Carte d'interprétation sismique et implantation du forage de reconnaissance.

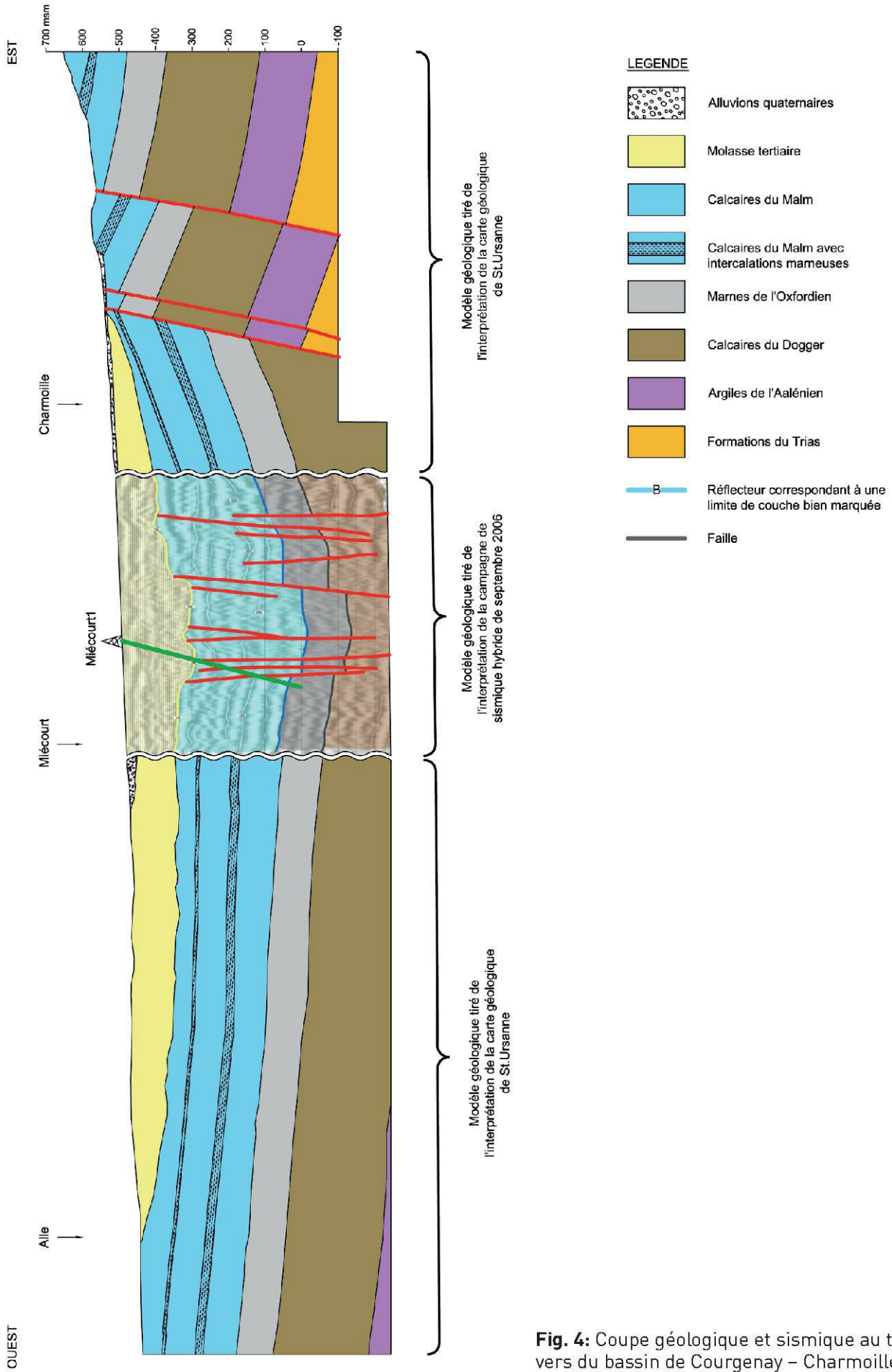


Fig. 4: Coupe géologique et sismique au travers du bassin de Courgenay – Charmoille.

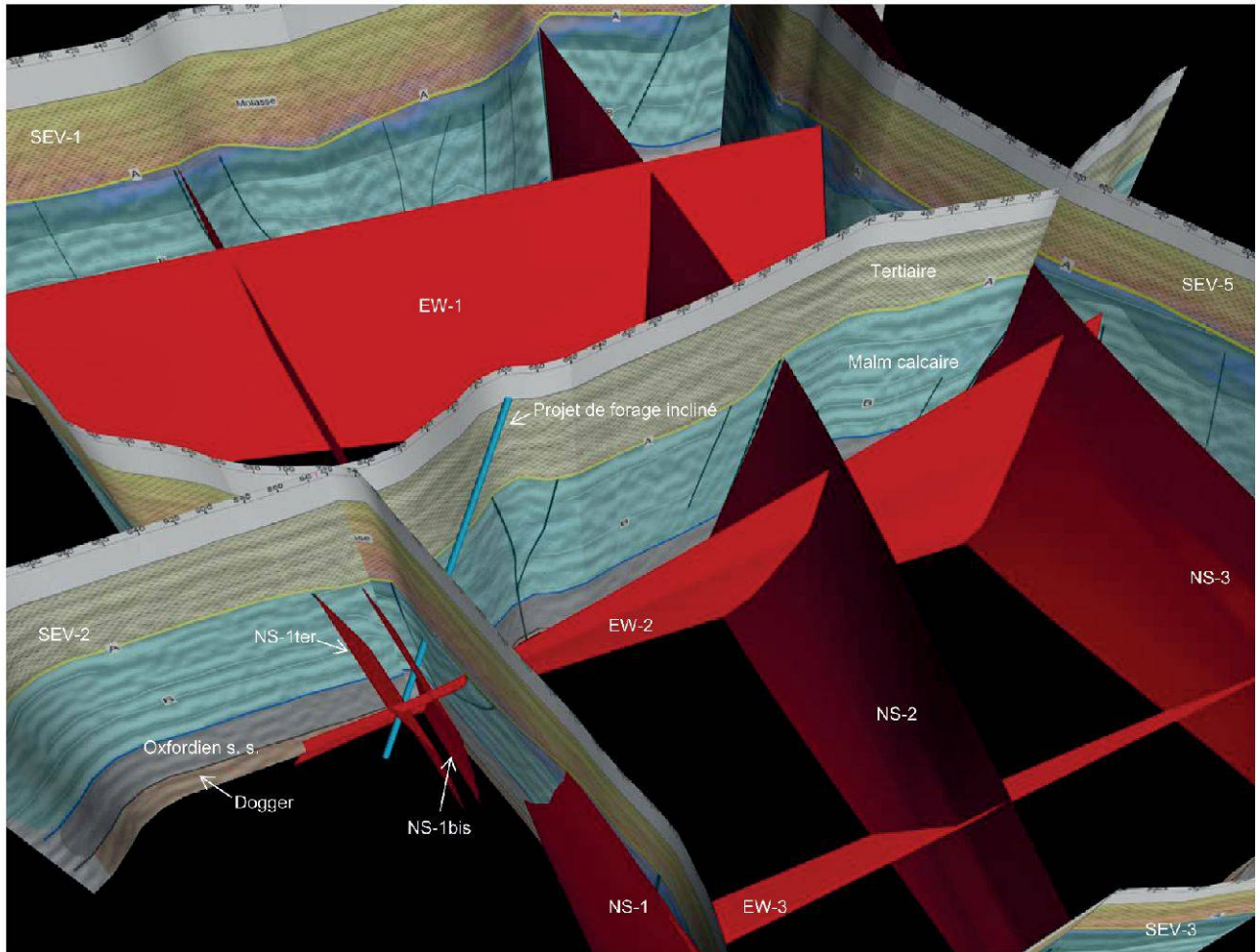


Fig. 5: Visualisation 3D des coupes sismiques et simulation du projet de forage incliné.

3. Stratigraphie synthétique du forage

L'analyse des échantillons (cuttings) prélevés tous les deux mètres en cours de foration a permis d'établir une coupe du forage (Fig. 6).

Les limites lithostratigraphiques proposées

sont le fruit d'une interprétation arrêtée sur des critères de faciès principalement, aucune analyse de micro-fossiles n'ayant été effectuée. Dans ce sens, les multiples descriptions fournies par la littérature (voir

Longueur forée	Formation géologique	Ø de forage	Fluide de circulation	Equipement
0–4.2 m	Alluvions quaternaires	475 mm	Boue	Tubage acier cimenté 450 mm
4.2–24.3 m	Alluvions quaternaires	17 ^{1/2}		Tubage acier cimenté 13 ^{3/8}
24.3–218.3 m	Molasse tertiaire	12 ^{1/4}		Tubage acier cimenté 9 ^{5/8}
218.3–565 m	Malm	8 ^{1/2}	Eau claire	Colonne acier crépinée 7 ^{1/2} (7.9% perforation) sans massif filtrant

Tab. 2: Diamètres de forage et équipements.

Maquette du forage Miécourt1
réalisée avec les cuttings prélevés au cours du chantier

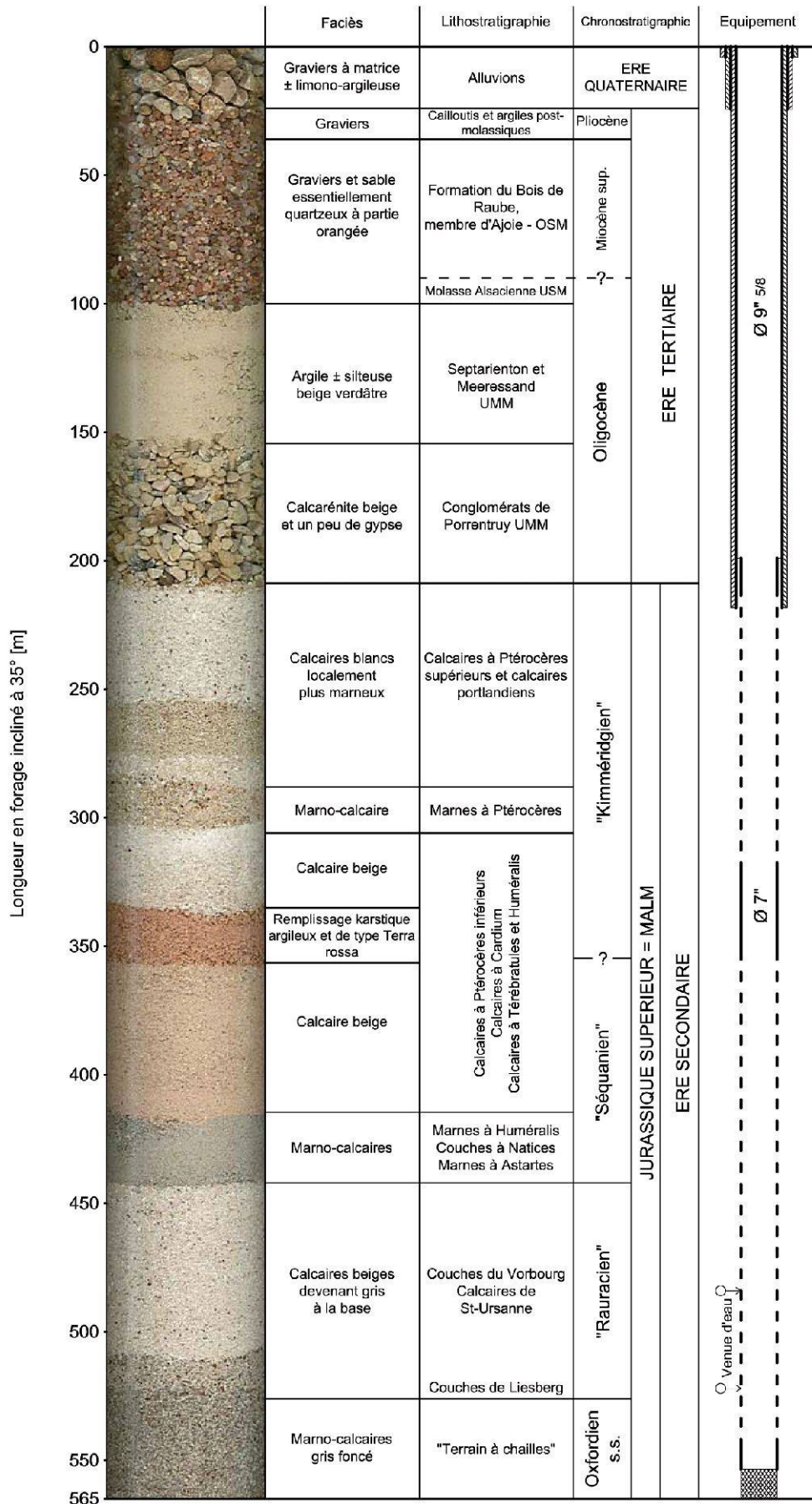


Fig. 6: Colonne lithostratigraphique du forage Miécourt 1.

bibliographie) se sont avérées essentielles et indispensables.

3.1 Les alluvions quaternaires

Ces dépôts quaternaires sont représentés par des graviers essentiellement calcaires de couleur beige. Quelques éléments roulés y sont présents de même que quelques grains de quartz laiteux et autres éléments issus de roche non sédimentaire.

L'épaisseur de cette formation est de l'ordre de 20 m. Vers la base, une matrice limono-argileuse procure à l'ensemble du dépôt une certaine cohésion.

3.2 Les formations tertiaires

La délimitation des différentes lithostratigraphies du remplissage tertiaire du bassin de Miécourt s'est inspirée de travaux de recherche antérieurs (Becker 2003, Picot 2002).

Les terrains tertiaires traversés peuvent ainsi être subdivisés en trois grands ensembles, de haut en bas:

- les sables et graviers de la Formation du Bois de Raube de l'OSM (Molasse d'eau douce supérieure) surmontés par les cailloutis et argiles post-molassiques. Ces formations datant de la fin de l'ère tertiaire (Miocène et Pliocène), sont principalement représentés par des graviers et sables à grains de quartz translucides, le plus souvent à patine oxydée rouge-orangée. On peut y retrouver sporadiquement quelques plaquettes de mica noir et des éléments à éclat métallique (oolithe pyriteuse ou ferrugineuse?). A la base de cet ensemble, la présence de la Molasse alsacienne (USM ou Molasse d'eau douce inférieure) n'est pas improbable, mais sur une faible épaisseur (environ 8 m). L'épaisseur de la totalité de cet ensemble est de 61 m;
- les argiles et sables du Septarienton et du Meeressand (UMM ou Molasse marine inférieure). Ces dépôts fins sont caractérisés par des marnes argileuses verdâtres

avec des passages sableux plus ou moins importants (grains de quartz pour l'essentiel). La puissance de cet ensemble est de 51 m;

- les conglomérats de Porrentruy (UMM). Ces dépôts détritiques sont essentiellement représentés par des calcarénites (calcaire à grains très fins) de couleur beige à grisâtre. Des fragments de gypse peuvent être visibles sporadiquement. L'épaisseur totale de cet ensemble est de 31 m;
- l'horizon-repère que peut représenter le Sidérolithique (Éocène), avec notamment ses niveaux ferrugineux, n'a pas été découvert dans ce forage.

Les dépôts tertiaires rencontrés dans le forage de Miécourt ont donc une épaisseur cumulée de 143 m.

3.3 Le Malm

La transition Tertiaire-Secondaire est assez clairement marquée par l'apparition de faciès calcaire franc et la disparition des grains de quartz. Cette transition a eu lieu à partir 202 m de longueur forée, soit 162 m de profondeur verticale. On distingue les unités suivantes, de haut en bas:

- les faciès essentiellement calcaires du «Kimméridgien» et du «Séquanien sup.» sur une épaisseur de 164 m. Ils se présentent sous la forme de calcaires blanchâtres ou beiges pouvant être entrecoupés de passages davantage marneux (Marnes à Ptéro-cères). Au sein de ces calcaires principalement massifs, des discontinuités tectoniques (failles, fractures) ont pu être relevées. Celles-ci font apparaître des fragments d'argile rouge mélangés avec des débris calcaires. Il s'agit là vraisemblablement de zones karstifiées ayant subi une phase de remplissage avec des matériaux argileux de type «Terra rossa». Trois zones faillées ont ainsi pu être mises à jour dans ces formations calcaires, dont la plus importante entre 336 et 353 m (longueur forée);

- les faciès marno-calcaires du «Séquanien inf.» sur une épaisseur de 29 m. De couleur davantage grisée, les cuttings montrent clairement la présence de débris tendres pouvant être assimilés à de la marne;
- les calcaires beiges du «Rauracien» sur une épaisseur de 67 m. Des zones faillées marquées par la présence de fragments d'argile rougeâtre ont également pu être repérées dans ces faciès de calcaires massifs, et notamment à partir de 469 m de longueur forée. Vers la base, la couleur a tendance à devenir davantage grisée et les éléments plus tendres (Couches de Liesberg?);
- les marno-calcaires gris-foncé de la partie sommitale de l'Oxfordien s. s. Il s'agit des «terrains à chailles» traversés sur 31 m d'épaisseur et annonçant les terrains franchement argileux et imperméables des «Argiles à Renggeri» sous-jacents, «terminus» du forage de Miécourt.

3.4 Comparaison entre prévisions et observations géologiques

Il est toujours intéressant de mettre en parallèle les prévisions géologiques élaborées en phase d'étude et les observations faites en forage. Cette démarche permet en effet de vérifier la pertinence du modèle géologique proposé.

La comparaison entre prévisions géophysiques et observations géologiques est donc illustrée dans la fig. 7. Elle amène les remarques suivantes:

- les calcaires du Malm ont été atteints à une altitude d'environ 35 m supérieure aux attentes, soit une différence de l'ordre de 10%;
- le toit de l'Oxfordien s. s. ayant été touché également 35 m avant les prévisions, l'épaisseur totale des formations essentiellement calcaires du Malm est conforme au modèle géologique-géophysique;
- les réflecteurs indiqués sur les coupes sismiques pourraient correspondre, moyennant un décalage de l'ordre de 30 m, à des passages marno-calcaires différenciés;

- la correspondance entre les accidents tectoniques notés sur les profils sismiques et les zones faillées repérées en forage est notable: les 4 discontinuités géophysiques

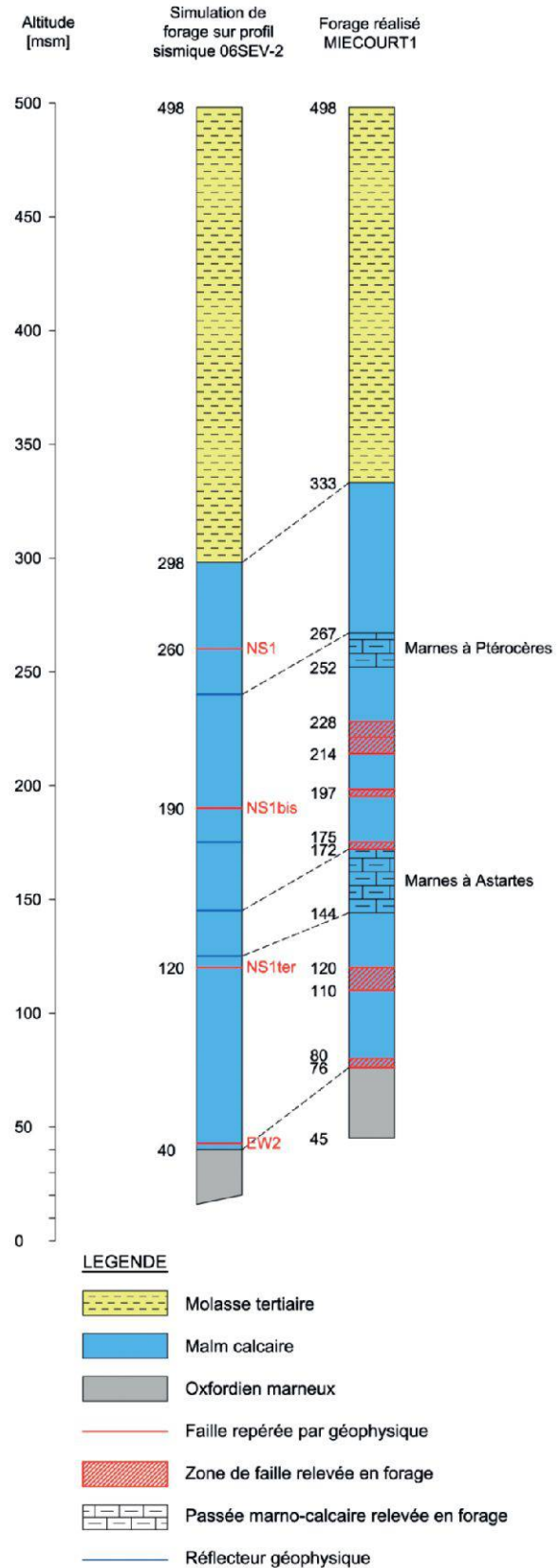


Fig. 7: Comparaison entre prévisions stratigraphiques et observations géologiques.

se traduisent dans la réalité du forage par 5 zones faillées dont la corrélation spatiale est, pour certaines d'entre elles, vérifiée.

4. Données hydrogéologiques

4.1 Aspects quantitatifs

4.1.1 Résultats d'ensemble

Le résultat le plus encourageant pour la suite des investigations a été la découverte de l'artésianisme jaillissant, le 22.07.08 à plus de 470 m de longueur forée (375 m de profondeur verticale). Le débit était alors de 20 l/min (Fig. 8). L'apparition de cette venue d'eau correspond vraisemblablement à une zone faillée repérée dans les calcaires massifs du «Rauracien» (Fig. 6).

Loin de tarir, le débit de cette venue d'eau a doublé en cours de foration pour atteindre 40 l/min. Mais le gain principal a été obtenu après les deux premières acidifications: le débit artésien est alors de 100 l/min. Après, le débit s'est plus ou moins stabilisé et la dernière mesure du débit, avant la fermeture de la tête de forage, était de 117 l/min.

Cet artésianisme naturel a permis de faire un suivi quantitatif et qualitatif durant plusieurs mois après le chantier (chap. 4.1.5, 4.2).

4.1.2 Apport des diagraphies géophysiques et développement par acidifications

Des diagraphies ont été prévues après la phase de foration afin de guider et cibler les opérations d'acidification. En d'autres termes, il s'agissait de repérer, dans le forage sans équipement, la localisation des différentes venues d'eau.

Ces opérations ont été effectuées les 5, 6 et 7 août 2008 par la société Terratec (Heitersheim, Allemagne). De nombreuses difficultés ont été rencontrées, notamment avec le scanner optique et les sondes diamètre et débitmètre. Seule la sonde température/conductivité a donné des résultats exploitables. Deux anomalies sont notoires, marquées par une «marche d'escalier» sur les courbes température et conductivité et par un pic sur les courbes de gradient température et conductivité:

- l'une de 483 à 485 m correspondant à un secteur faillé repéré dans les calcaires massifs du Rauracien et dont la partie



Fig. 8: Venue d'eau artésienne sortant du tubage 9"5/8.

- sommitale a vraisemblablement donné lieu à l'apparition de la venue d'eau artésienne;
- l'autre de 520 à 524 m marquant également une zone faillée juste au toit des formations marneuses de l'Oxfordien s. s.

Compte tenu du phénomène d'artésianisme et de circulations naturelles à l'intérieur du forage, le gradient géothermique a été calculé par la différence entre, d'une part, la température mesurée par diagraphie face à la venue d'eau la plus profonde (21.8°C) et, d'autre part, la température moyenne annuelle en surface (admise à 10°C dans la région). On obtient ainsi un gradient de 2.8°C/100 m, ce qui est du même ordre de grandeur que celui trouvé dans les forages de Delémont (3.2°C/100 m) et inférieur à la valeur de 3.6°C/100 m des forages de Courtemaîche (Dogger).

Les cibles d'injection de l'acide chlorhydrique une fois définies, les opérations de développement se sont succédées en deux phases principales, séparées l'une de l'autre par la mise en place d'un packer (Tab. 3).

La mise en place du packer, entre les deux horizons supposés productifs, a été difficile, principalement en raison de l'inclinaison du forage et d'un passage délicat de 336 à 353 m

(secteur excavé avec remplissage argileux). Finalement, son utilisation s'est soldée par des résultats peu probants.

4.1.3 Essais de pompage

Essais de puits

Dans le forage de Miécourt 1, 4 essais de puits (pompages par paliers) ont été réalisés.

Les courbes caractéristiques résultant de ces essais (Fig. 9) présentent plusieurs aspects:

- les deux dernières acidifications ont entraîné un gain de production significatif, avec un débit critique situé à plus de 350 l/min;
- les deux essais de pompage suivants montrent, par contre, une perte de production qui n'atteint, cependant, pas la situation après les deux premières acidifications. La mise en place de la colonne crépinée et le développement du forage peuvent en être responsables.

Néanmoins, les courbes caractéristiques correspondantes ne mettent pas en évidence de débit critique, les courbes n'indiquant pas de fléchissement. La pompe ayant été installée vers 190 m de profon-

Chronologie des évènements		Date	Quantité [T]	Profondeur [m]	Remarques
1 ^{ère} phase	1 ^{ère} acidification	12.08.08	7.4	524	Pas de pompage, ni de nettoyage après la 1 ^{ère} acidification
	2 ^{ème} acidification	14.08.08	7.6	485	
Essai de pompage		du 25.08.08 au 29.08.08			Pompage peu prometteur
Mise en place du packer		03.09.08		490	Packer endommagé et étanchéité non garantie!
2 ^{ème} phase	3 ^{ème} acidification	04.09.08	15	491	
	Déplacement packer	08.09.08		499	
	4 ^{ème} acidification	09.09.08	15	500	

Tab. 3: Opérations de développement du forage par acidifications (HCl).

deur, tous les tests de pompage sont stoppés lorsque le niveau d'eau dépasse 180 m de profondeur (base de la chambre de pompage 9^m5/8), soit un rabattement correspondant à un tiers de la longueur du forage.

Pompages longue durée

Le pompage d'essai de longue durée prévu contractuellement dans le forage Miécourt 1 a débuté le 25.09.08 avec un débit au démarrage d'environ 350 l/min. Il a été poursuivi jusqu'au 02.10.08 avec un débit stabilisé de l'ordre de 300 l/min. La représentation graphique de la courbe de descente (courbe «rabattement – temps», Fig. 10) montre clairement un palier du niveau d'eau situé vers 150 m de profondeur. Cette inflexion marque une tendance à un régime d'écoulement permanent (et non plus transitoire), traduite en termes hydrogéologiques, par l'approche d'une limite d'alimentation de l'aquifère ou limite à potentiel imposé. Par contre, la poursuite du pompage met en évidence une réaugmentation du rabattement, ce qui indi-

querait un aquifère limité latéralement par une limite «étanche» (discontinuité hydraulique liée à la géométrie du karst ou faille).

Un deuxième pompage de longue durée, débuté le 03.10.08 en pompage par paliers, a été poursuivi jusqu'au 10.10.08 (Fig. 10). La courbe «rabattement – temps» montre un niveau d'eau, en fin de pompage, situé vers 180 m et en faible progression (de l'ordre de 7 cm/h). Le débit était alors plus ou moins stabilisé autour de 310 l/min.

Conclusions des essais de pompage

Ces deux types d'essais de pompage ont donc montré qu'il est raisonnable d'envisager, dans la configuration actuelle du forage, un débit maximum de production de 300 l/min pour un rabattement maximum admissible de 180 m. Un véritable pompage de longue durée (1 à 2 mois minimum) serait cependant nécessaire afin de contrôler, à long terme, la stabilité du couple débit/rabattement.

Une première approximation de la perméabilité de l'aquifère peut être faite à partir des

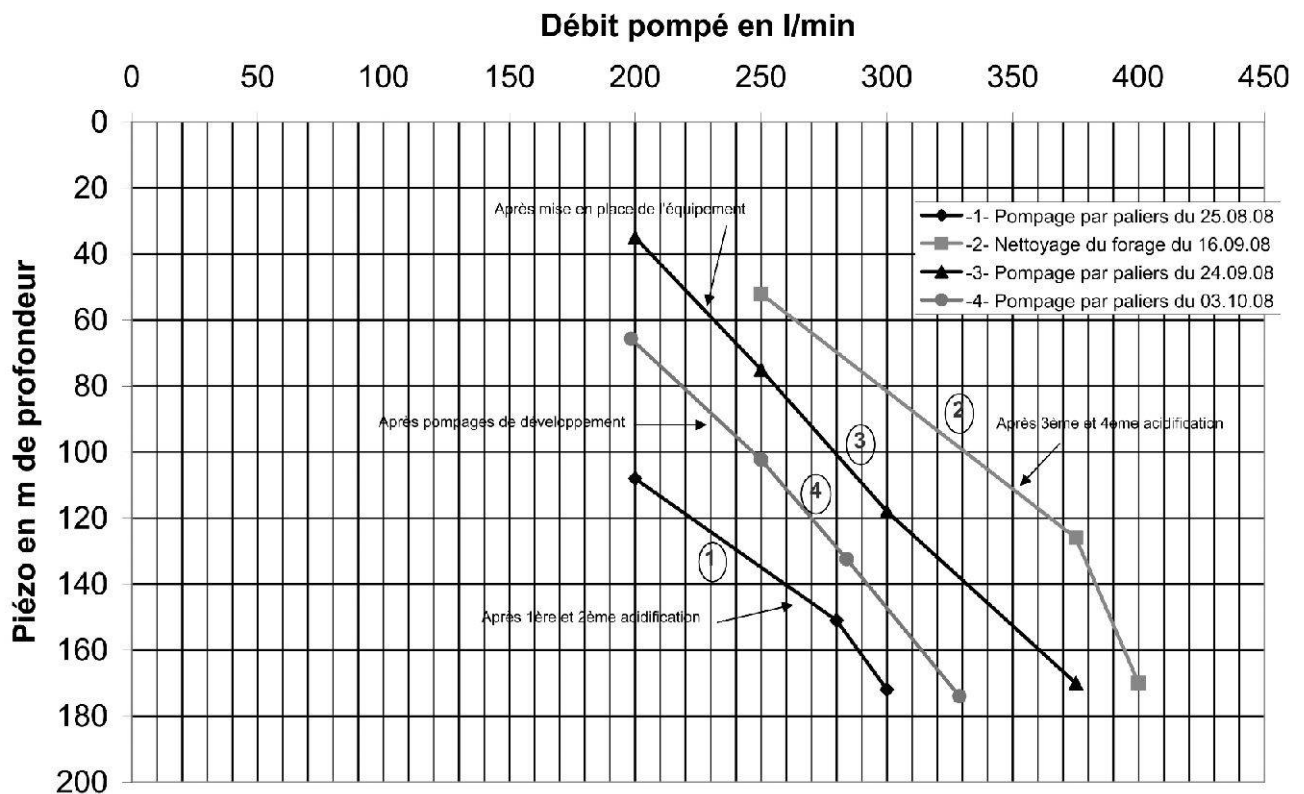


Fig. 9: Courbes caractéristiques du forage Miécourt 1.

données recueillies pendant les essais de pompage. Le choix des méthodes de calcul des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère (calcul de Dupuit pour nappe captive en régime permanent et expression d'approximation semi-logarithmique de Jacob en régime transitoire) est limité par le fait qu'il ne soit pas homogène, ni isotrope. De plus, l'absence de piézomètre autour du forage ne permet d'obtenir des valeurs de perméabilité qu'à proximité immédiate de l'ouvrage.

Les perméabilités calculées varient ainsi de 3×10^{-7} à 5×10^{-8} m/s. Elles correspondent en valeur absolue à un faible degré de perméabilité et caractérisent de fait un « bloc peu perméable ». Mais, si l'on ne prend en compte que les zones effectivement productives recoupées par le forage, soit vraisemblablement une dizaine de mètres d'épaisseur totale (chap. 4.1.2), la perméabilité résultante s'élève alors de 3×10^{-7} à 1×10^{-6} m/s.

Ces deux plages de coefficients de perméabilité traduisent en fait l'hétérogénéité et le caractère discontinu de tout aquifère karstique. Elles sont marquées par un effet d'échelle et n'ont pas de véritable portée régionale.

4.1.4 Suivi de l'artésianisme

Le débit artésien du forage a pu être suivi après la période de chantier grâce à la mise en place d'une chambre à vanne à proximité du forage et la pose d'un tuyau en PE (\varnothing 40 mm) jusqu'au réseau d'eaux usées de Miécourt (700 m).

L'ouverture de la vanne a eu lieu le 20.11.08 et la fermeture le 04.06.09, soit une période de suivi de 6.5 mois.

Les mesures de débit réalisées au cours de ce suivi ont été synthétisées dans le graphique suivant (Fig. 11).

Ainsi, le débit mesuré à l'exutoire dans les eaux usées de Miécourt marque une légère décroissance et semble se stabiliser autour de 50 l/min. Ce faible débit, comparé à celui mesuré en cours de chantier s'explique par les pertes de charge liées au diamètre du tuyau d'amenée (40 mm pour le tuyau PE et 180 mm pour la colonne crépinée dans le forage) et la distance entre forage et rejet.

On peut constater que les variations météorologiques, qui ont des répercussions remarquables sur le débit des sources kars-

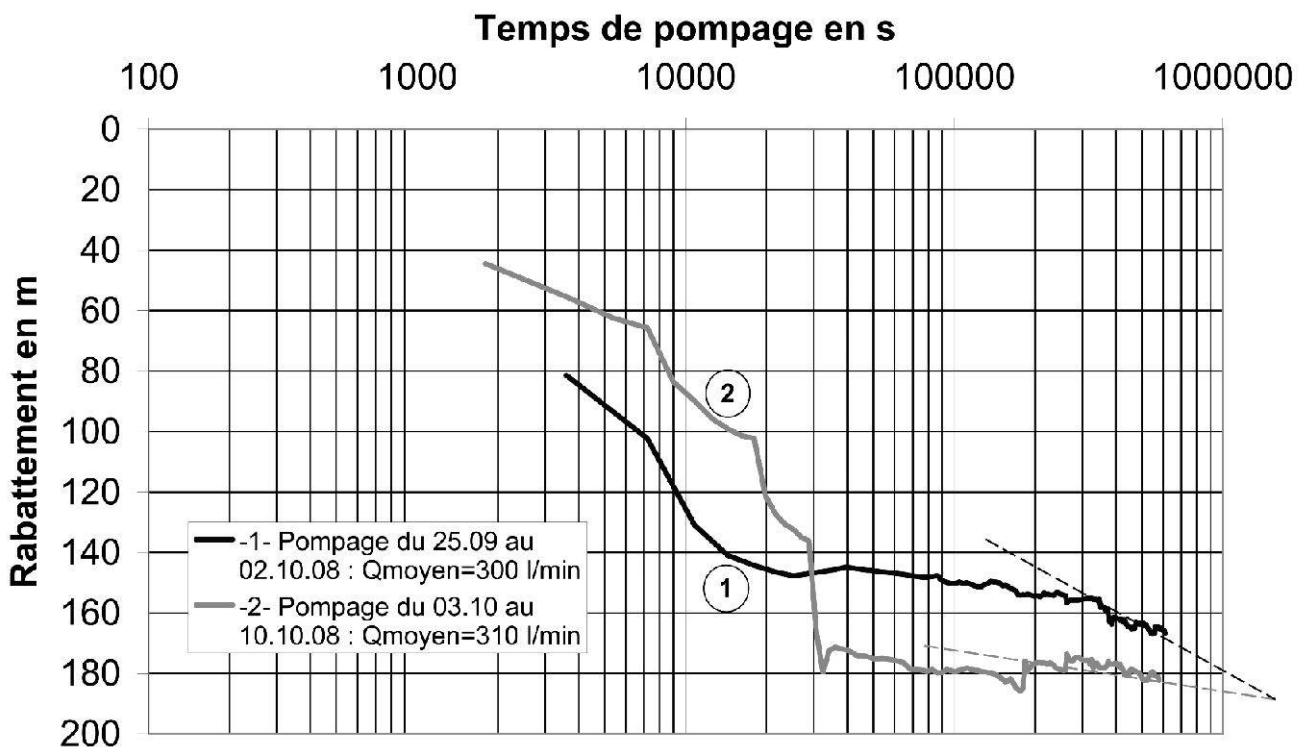


Fig. 10: Résultats des pompages de longue durée.

tiques (crue, décrue, tarissement, étiage), n'ont, dans le cas de ce forage, aucune influence.

Enfin, quelques mesures ponctuelles ont été réalisées à 70 m en aval de la chambre (par ouverture du tuyau d'amenée au niveau d'un raccord): elles sont de l'ordre de 80 l/min.

Il semble donc bien que le débit artésien que puisse produire le forage Miécourt 1 est de l'ordre de 100 l/min. Seuls un suivi du débit sur au moins un cycle hydrologique ou l'utilisation future de cet ouvrage (chap. 5) permettraient de confirmer, à long terme, ce débit. Enfin, la mesure de la charge hydraulique avec la vanne fermée indique une valeur de 3 bar.

4.2 Aspects qualitatifs

4.2.1 Une signature chimique particulière

Portée sur un diagramme de Schoeller (Fig. 12), la minéralisation montre que les eaux du forage Miécourt 1 sont bicarbonatées calciques, typologie classique pour un environnement calcaire. Comparativement aux eaux karstiques de la région (sources du Saivu à Boncourt, de la Golatte à Asuel, de la Vendline à Vendlincourt et du Betteraz à Porrentruy), la spécificité des eaux du forage Miécourt 1 se traduit en plus par une signature sodique, magnésienne, potassique et chloru-

rée, les composantes potassique et chlorurée étant moins marquées que les deux premières.

Il est également possible de comparer ces eaux à celles d'autres forages profonds (SON3 à Sonvilier, COUR-3 à Courtemaîche, FM2 à Muriaux, F5 à Yverdon et S2 à Delémont, Fig. 1): elles s'apparentent à celles du forage géothermique F5 du Centre Thermal d'Yverdon-les-Bains, réalisé en 1998 (Muralt 1999). Les eaux des couches du Dogger rencontrées dans ce forage à plus de 1000 m de profondeur, ont démontré un chimisme dont le type est analogue à celui du forage Miécourt 1, avec cependant des concentrations en sodium et chlorures dix fois plus importantes. Dans une moindre mesure, le chimisme des eaux de Miécourt 1 s'approche de celui du forage FM2 de Muriaux dont les eaux captées proviennent également des couches du Dogger (Hessenauer 2001).

Par contre, les différences sont notoires avec les eaux captées dans les couches du Malm des forages de Sonvilier (Rieben 1999) et de Delémont (Flury et al. 1991).

Enfin, le chimisme des eaux de Miécourt 1 est très éloigné de celui des eaux saumâtres du forage de Courtemaîche (Boem et al. 2006).

4.2.2 Potabilité de la ressource

Du point de vue physico-chimique, les eaux profondes captées présentent, en particu-

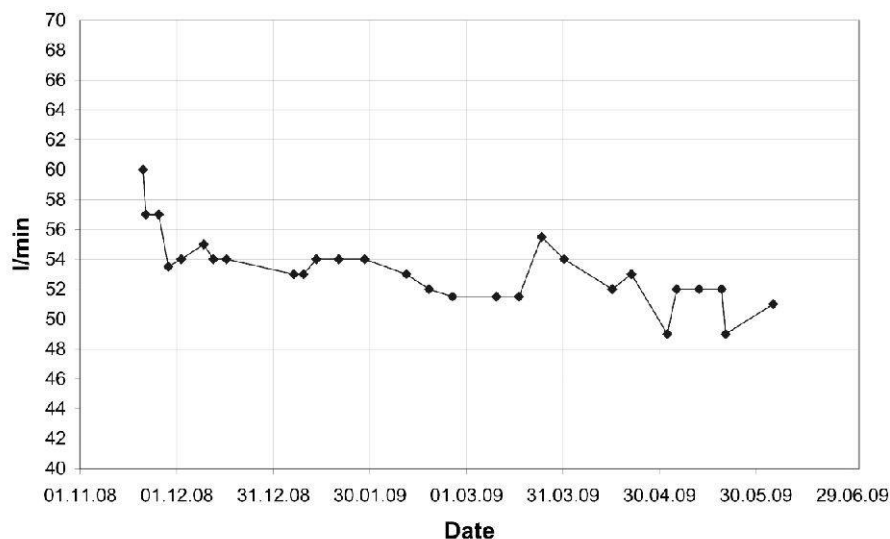


Fig. 11: Suivi du débit artésien après chantier.

lier, une température logiquement élevée (de l'ordre de 18°C en tête de puits et en régime artésien naturel) et hors normes: le manuel suisse des denrées alimentaires (MSDA, Office Fédéral de la Santé Publique, 1991) donne des valeurs directrices de température comprises entre 8 et 15°C.

D'autre part, les différentes analyses effectuées (Tab. 4) ont clairement démontré une signature chimique particulière des eaux captées dans Miécourt 1. Pour ces éléments chimiques, la législation actuellement en vigueur (OSEC, Ordonnance du DFI du 26 juin 1995 sur les substances étrangères et les composants dans les denrées alimentaires, RS 817.021.23) ne donne pas de valeurs en termes de tolérance et/ou de limite de potabilité. Par contre, le MSDA indique des valeurs directrices: le sodium et le potassium atteignent ces valeurs, les chlorures les dépassent et le magnésium reste inférieur.

Les teneurs insignifiantes des eaux captées en nitrates, carbone organique (DOC), oxy-

dabilité, l'absence de micropolluants d'origine industrielle ou agricole et la pureté bactériologique 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 indiquent une relative sensibilité de l'aquifère profond capté aux pollutions «naturelles» liées au milieu faiblement oxygéné et aux conditions sulfito-réductrices: le fer (sous sa forme réduite Fe²⁺) dépasse la valeur de tolérance légale, le sulfure est décelable par son odeur, l'ammonium dépasse légèrement la valeur directrice du MSDA et la saturation en oxygène reste faible.

Ces premiers résultats qualitatifs montrent que, dans l'hypothèse d'une utilisation du forage pour l'alimentation humaine, un traitement des eaux sera nécessaire. Des analyses complémentaires permettront de mieux cibler le choix de la filière de traitement, mais d'ores et déjà, un traitement simple se justifie: oxydation – décantation – filtration.

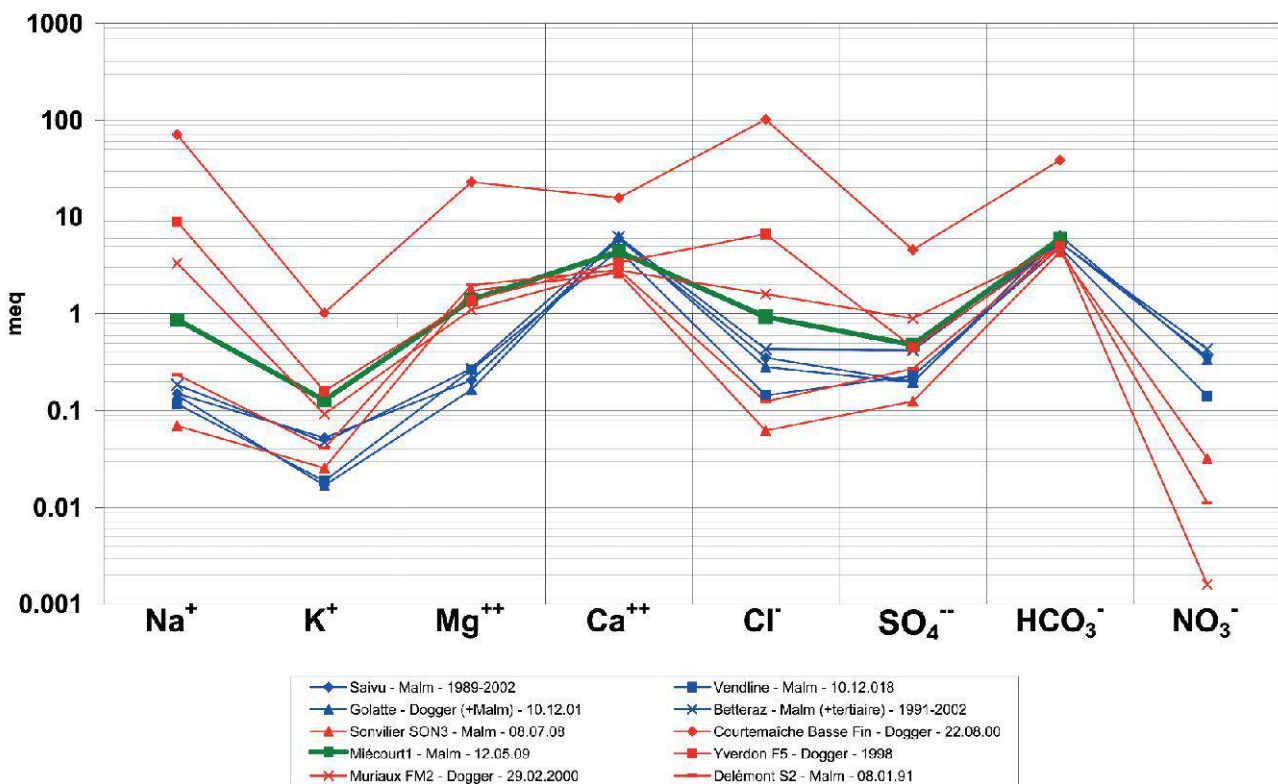


Fig. 12: Diagramme de Schoeller représentant les concentrations en éléments majeurs de différents points d'eau.

Paramètres	Unité	Dates de prélèvement							Législation		
		11.08.2008	09.10.2008	16.12.2008	13.01.2009	17.02.2009	17.03.2009	12.05.2009	MSDA	OSEC	
									Directrice	Tolérance	Limite
Température	°C		22	16.4	16.7	18.1	18.2	18.2	8 - 15		
pH		7.51	7.03		7.2	7.41	7.38	7.35	6.8 - 8.2		
Conductivité à 20° C	µS/cm	611	717	644	610	590	582	560	200 - 800		
Odeur			Purin / eaux usées	Œufs pourris, métallique	H2S et métallique	H2S et métallique	H2S et métallique	H2S et métallique			
Teneur en O ₂	mg O ₂ /l		1.35	4.5	4.4	4.72	4.7	4.54			
Saturation en oxygène	%		16	51	47	47	47	52.6	>30		
Turbidité	FTU	53	2.3	Pas possible	Pas possible	Pas possible	Pas possible	Pas possible	<0.1	1	
Oxydabilité	mg KMnO ₄ /l		<1.6						<3		
Abs. UV à 254 nm	m ⁻¹		1.7								
DOC	mg C/l	0.48	<0.40						<1		
Ammonium	mg NH ₄ ⁺ /l	0.2	0.112	0.057	0.054	0.063	0.063	0.063	<0.05	0.5	
Nitrite	mg NO ₂ ⁻ /l	0.02	3		<0.2	<0.1	<0.2	<0.2	<0.01	0.1	
Nitrate	mg NO ₃ ⁻ /l	<0.07	<0.016		<0.3	<0.15	<0.3	<0.3	<25	40	
Dureté carbonatée	°f	25.9	27.3								
Dureté totale	°f	25.9	33.8						>10		
Calcium	mg Ca ⁺⁺ /l	71	107		130	90	90	88	<200		
Magnésium	mg Mg ⁺⁺ /l	20	17		17	17	17	17	<50 - 125		
Potassium	mg K ⁺ /l	7.7	5.6		5.4	5	5	5	<5		
Sodium	mg Na ⁺ /l	38	23		21	20	20	20	<20		
Fluore	mg F ⁻ /l	1	0.67		0.8	0.9	0.8	1	<0.5	1.5	
Chlorure	mg Cl ⁻ /l	47	73	55	43	37	33	33	<20		
Ortho-phosphate	mg PO ₄ ³⁻ /l			<0.02	<0.3	<0.75	<0.75	<0.75	<0.05	3 (avec traitement)	
Bromure	mg Br ⁻ /l	0.3			<0.15	<0.2	<0.15	0.15			
Sulfate	mg SO ₄ ²⁻ /l	27	24		21	20	21	23	<50		
Sulfure	mg S ²⁻ /l			0.04	0.055	0.071	0.072	0.044	Organoleptiquement non décelable		
Escherichia coli	UFC/100 ml		0	0	0	0	0	0			
Entérocoques	UFC/100 ml		0	0	0	0	0	0			
Germes aérobies mésophiles	UFC/1 ml		292	2	0	1	0	0			
Mercur	µg/l			<0.1					<0.1		1
Cyanure libre	mg CN ⁻ /l			<0.005							0.05
Béryllium dissous	µg/l		< 0.1								
Aluminium dissous	µg/l		6.4						<50	200	
Vanadium dissous	µg/l		0.8								
Chrome dissous	µg/l		1.5						<1		20
Manganèse dissous	µg/l		12						<20	50	
Cobalt dissous	µg/l		< 0.5								
Nickel dissous	µg/l		< 0.5								
Cuivre dissous	µg/l		0.8						<20	1500	
Zinc dissous	µg/l		14						<100	5000	
Arsenic dissous	µg/l		4.9	4.1		4.1	2.8	6	<2		50
Sélénium dissous	µg/l		< 0.5						<1		10
Molybdène dissous	µg/l		< 5								
Cadmium dissous	µg/l		< 0.1						<0.5		5
Etain dissous	µg/l		< 0.5								
Antimoine dissous	µg/l		< 0.5								
Thallium dissous	µg/l		< 0.5								
Plomb dissous	µg/l		< 0.5						<1		10
Thorium dissous	µg/l		< 0.5								
Uranium dissous	µg/l		< 0.1								
Strontium dissous	µg/l	lég. positif			positif	positif	positif	positif			
Lithium dissous	µg/l							positif	positif		
Fe ²⁺	mg Fe ²⁺ /l		0.9								
Fer dissous	mg/l	Fort. positif	1.2	7.8	6.5	5.2	5	5	<0.05	0.3	
Pesticides	ng							<10		100 (par subst.)	
Hydrocarbures halogénés volatils	µg/l	<0.20	<0.20						1	20	
Méthyl tert-butylether (MTBE)	µg/l		<0.10								
Ethyl-tert-butylether (ETBE)	µg/l		<0.10								
BTEX	µg/l		<0.10						<0.1	1	
Naphtalène	µg/l		<0.20						<0.1	0.2	
Screening volatils			1)								
Screening L/L			2)	3)							

1) aucune substance détectée

2) présence d'alcools à longues chaînes aliphatiques et d'alcools polyéthoxyles

3) les 5 substances détectées sont en quantité infimes à l'exception du 2-propionico acid, n-pentadecyl ester. Cette dernière peut provenir de l'installation du forage

Abbréviations :

MSDA : Manuel suisse des denrées alimentaires

OSEC : Ord. sur les substances étrangères et les composants du 26.06.95 RS 817.021.2

Tab. 4: Récapitulatif des résultats d'analyses chimiques et bactériologiques des eaux captées dans Miécourt 1.

4.2.3 Analyses isotopiques

Le forage a fait l'objet d'un prélèvement d'eau le 30.09.08 pour l'analyse du tritium, de l'oxygène 18 et du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Les résultats obtenus (Tab. 5) appellent divers commentaires et explications.

La concentration en tritium apparaît inférieure au seuil de détection de l'appareil de mesure. Le laboratoire d'analyse (Hydroisotop gmbh, Allemagne) en déduit très logiquement que les eaux captées dans le forage sont âgées de plus de 50 ans et qu'elles correspondent à l'infiltration de précipitations antérieures à 1952, date des premiers essais thermonucléaires aériens. Des valeurs inférieures à 2 UT sont plutôt caractéristiques d'eaux provenant d'aquifères profonds. Ainsi, le temps de séjour des eaux pourrait être de 1'000 à 2'000 ans (Olive et al. 1995).

Seule la mise en œuvre d'analyses isotopiques complémentaires (par exemple le radioc carbone ^{14}C et l'argon-39 ^{39}Ar) permettrait en fait de préciser l'âge de ces eaux.

Cette valeur de tritium couplée au chimisme singulier des eaux du forage montre qu'il s'agit vraisemblablement de l'héritage d'un mélange entre deux eaux: l'une possède les caractéristiques intrinsèques de l'aquifère du Malm et l'autre, d'origine plus profonde, apporterait des eaux plus minéralisées de l'aquifère du Dogger à travers les marnes de l'Oxfordien s. s. (circulation par le biais d'accidents tectoniques verticaux majeurs affectant toute la série sédimentaire du Jurasique?). Une autre hypothèse consisterait à imaginer l'infiltration d'eaux météoriques au travers des formations affleurantes du Trias, du Lias et du Dogger dans le secteur de l'anticlinal du Mont Terri (à environ 3 km au Sud

Isotope [unité]	Valeur
Tritium ^3H [UT]	< 0.6
Oxygène-18 $\delta^{18}\text{O}$ [%]	-9.97
Strontium rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [-]	0.708709±0.00002

Tab. 5: Résultats des analyses isotopiques de l'échantillon d'eau prélevé le 30.09.08.

du forage) et, dans un certain contexte tectonique (chevauchement), la «contamination» de l'aquifère du Malm par ces eaux davantage minéralisées.

La teneur en oxygène-18 est un bon indicateur de l'altitude moyenne du bassin versant des eaux du forage Miécourt 1. Le rapport du laboratoire ne donne pas d'indication chiffrée. Il s'avère, cependant, que la valeur mesurée est très proche de celles obtenues pour les forages profonds de la vallée de Delémont ($\delta^{18}\text{O} = -9.79 \pm 0.15$): l'aire d'alimentation serait située entre 600 et 700 m d'altitude.

Dans la région de Miécourt, de telles altitudes correspondent aux zones d'affleurement des calcaires du Malm situées de part et d'autre du bassin tertiaire de Miécourt, ainsi qu'aux formations du Dogger, du Lias et du Trias localisées au Sud de ce bassin dans l'anticlinal du Mont Terri.

Le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 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 des temps géologiques dans les carbonates marins, il représente donc un intéressant paramètre d'identification de la roche réservoir. La valeur mesurée à Miécourt correspond, selon le laboratoire d'analyses, à un domaine de valeurs habituel pour des eaux souterraines circulant dans les calcaires du Malm.

5. Perspectives d'exploitation

5.1 Possibilités d'exploitation par le SEV

Avec une ressource exploitable d'environ 300 l/min, le forage Miécourt 1 ne convient malheureusement pas aux besoins en eau potable du SEV.

En effet, la cible minimale envisagée à l'origine par ce Syndicat était le remplacement de la source karstique de la Golatte à Asuel, dont le débit moyen est de l'ordre de 450 l/min.

Dans ce sens, la campagne de prospection

par forage profond peut être qualifiée de semi-échec puisqu'elle ne répond pas aux attentes du Maître d'Ouvrage.

Il subsiste cependant que ces investigations ont démontré le potentiel exploitable de l'aquifère karstifié du Malm:

- du point de vue qualitatif, la ressource présente des eaux souterraines d'un bon équilibre physico-chimique ne nécessitant que la mise en œuvre d'un traitement simple (chap. 4.2);
- du point de vue quantitatif, la réalisation de plusieurs forages profonds permettrait d'atteindre, voire dépasser, les objectifs fixés.

5.2 Autres perspectives d'exploitation

5.2.1 Géothermie

Avec des eaux souterraines de l'ordre de 18 à 20°C, l'exploitation géothermique du forage Miécourt 1 est totalement envisageable.

Les données de débit et de température permettent de calculer le potentiel thermique de la ressource: il est d'environ 84 kW.

Avec une pompe à chaleur dont le coefficient de performance (COP) serait de 3, la puissance utile d'un tel dispositif atteindrait environ 250 kW. A titre d'exemple, avec des besoins calorifiques de l'ordre de 15 kW pour une villa, cette ressource géothermique permettrait le chauffage d'une quinzaine de nouvelles maisons.

5.2.2 Mise en bouteilles

Sans aucun système de pompage, la ressource découverte par le forage Miécourt 1 représente un volume d'eau de l'ordre de 140'000 litres/jour.

La mise en bouteille de l'eau du forage Miécourt 1 serait envisageable dans la mesure où elle entrerait dans le cadre de la législation actuelle sur les eaux minérales naturelles (Ordonnance du DFI sur l'eau potable, l'eau de source et l'eau minérale du 23/11/05 - RS 817.022.102).

Des traitements simples peuvent être admis et notamment la décantation et la filtration, éventuellement après aération avec de l'air hygiéniquement irréprochable.

5.2.3 Autres applications possibles

A titre indicatif, d'autres utilisations envisageables du forage Miécourt 1 peuvent être mentionnées: thermalisme, pisciculture, agriculture (irrigation, abreuvoir, serre), fontaine.

6. Conclusions

La campagne de prospection d'eau souterraine par forage profond incliné à Miécourt en 2008 s'est conclue avec succès, si l'on considère la découverte d'eau artésienne dans l'ouvrage réalisé.

Le forage Miécourt 1, incliné à 35° par rapport à la verticale, a capté des venues d'eau à la base des calcaires du Malm à partir d'une profondeur verticale d'environ 390 m.

Par contre, les objectifs quantitatifs fixés par le Maître d'Ouvrage, le Syndicat des Eaux de la Vendline (SEV), n'ont pas été atteints. En effet, l'estimation du débit pouvant être pompé à long terme dans Miécourt 1, sous réserve d'un essai de pompage longue durée (plusieurs mois), est de 300 l/min, soit de l'ordre de 200 l/min de moins que le débit minimum attendu.

Dans l'état actuel de l'ouvrage, les travaux se soldent néanmoins par une venue d'eau pérenne en surface (artésianisme jaillissant, 3 bar mesurés) dont le débit peut être estimé à long terme de l'ordre de 100 l/min.

Du point de vue qualitatif, ces eaux reflètent la particularité de l'aquifère karstique découvert en profondeur. Outre une composition chimique classique de type bicarbonaté calcique liée aux calcaires du Malm, elles portent une signature singulière, principalement sodique et magnésienne et secondairement potassique et chlorurée, propre à une composante vraisemblable-

ment d'origine plus profonde (Dogger). Ces caractéristiques n'ont aucune influence sur la potabilité de la ressource. Seule la présence de fer et de sulfures nécessiterait un traitement simple dans le cas d'une utilisation comme eau potable.

Contrairement à la plupart des points d'eau du secteur, la qualité bactériologique des eaux du forage Miécourt 1 est irréprochable. De plus, l'excellente protection de l'aquifère capté est soulignée par l'absence de polluants d'origine anthropique et industrielle. Les perspectives d'avenir quant à l'utilisation de ce forage sont multiples:

- 1] Concernant le SEV, associé à d'autres forages profonds réalisés à moyen terme, il permettrait de subvenir aux besoins de diversification des apports en eau du Syndicat.
- 2] Exploitation de la ressource géothermique.
- 3] Exploitation de la ressource comme eau minérale naturelle.

Remerciements

Cette étude a été financée par le Syndicat des Eaux de la Vendline (SEV) avec le soutien de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) et de l'Office de l'Environnement du Canton du Jura (ENV). Nous tenons particulièrement à remercier M. B. Corbat, président du SEV, ainsi que tous les membres du Conseil d'Administration du Syndicat.

Bibliographie

- Becker, D. & Civelli, K. 2002: Le Tertiaire du Jura le long de la Transjurane: premiers résultats paléontologiques et stratigraphiques. Rapport d'activités 2001. Office de la Culture du Canton du Jura, section paléontologie et transjurane.
- Becker, D. 2003: Paléoécologie et paléoclimats de la Molasse du Jura (Oligo-Miocène): apport des Rhinoceroidea (Mammalia) et des minéraux argileux. *GeoFocus*, Volume 9, thèse de l'Université de Fribourg N° 1416, p. 327.

- Beom, J.-M., Flury, F. & Rieben, C. 2006: Recherche d'eau par forages profonds dans le Dogger (Grande Oolithe) du Jura tabulaire à Courtemaître (Jura, Suisse). *Bull. géol. appl.* 11/1, 19-34.
- Diebold, P., Laubscher, H.-P., Schneider, A. & Tschopp, R. 1963: Atlas géologique de la Suisse 1:25'000. Feuille 1085 St-Ursanne. Notice explicative de H.-P. Laubscher. Commission géologique suisse.
- 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, p. 841-849.
- Grétilat, P.-A. 1996: Systèmes aquifères karstiques de l'Ajoie. Eléments pour la carte hydrogéologique au 1:25'000. Thèse de l'Université de Neuchâtel.
- Hessenauer, M., Rieben, C. & Flury, F. 2001: Prospection d'eau souterraine par forages profonds à Muriaux (Canton du Jura). *Bull. géol. appl.* 6/2, 147-164.
- MFR Géologie-Géotechnique SA 2002: Mise en valeur de l'aquifère profond du Malm dans le bassin tertiaire du Sud-Est de l'Ajoie. Etude préliminaire: rapport géologique. Syndicat des Eaux de la Vendline (SEV).
- MFR Géologie-Géotechnique SA 2007: Projet d'exploration hydrogéologique au Sud-Est de l'Ajoie (JU). Etape 1: campagne de prospection sismique hybride. Rapport technique. Syndicat des Eaux de la Vendline (SEV).
- MFR Géologie-Géotechnique SA 2008: Forage profond d'exploitation à Sonvilier. Rapport technique d'exécution. Groupement régional du SEF et de St-Imier (GSS).
- MFR Géologie-Géotechnique SA 2009: Projet d'exploration hydrogéologique au Sud-Est de l'Ajoie (JU). Etape 2: chantier de forage profond incliné à Miécourt. Syndicat des Eaux de la Vendline (SEV).
- Mural, R. 1999: Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien. Thèse de l'Université de Neuchâtel.
- Olive, Ph., Hubert, P. & Ravailleau, S. 1995: La datation des eaux souterraines par le tritium. Cours postgrade EPFL, 15 p.
- Picot, L. 2002: Le Paléogène des synclinaux du Jura et de la bordure sud-rhénane: paléontologie, paléoécologie, biostratigraphie et paléogéographie. *GeoFocus*, Volume 5, thèse de l'Université de Fribourg.
- Rieben, C. 1999: Recherche d'eau à 666.6 m de profondeur. *Revue GWA 7/99* de la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux.
- Tschopp, R. (1960): Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt Miécourt (Berner Jura). *Beitr. zur Geol. Karte der Schweiz*, Lief. 110, Bern, p. 62.