Prospection d'eau souterraine par forages profonds dans le Vallon de St-Imier



DEHE

Direction:

Office de l'économie hydraulique et énergétique du Canton de Berne

Réalisation:

MFR Géologie-Géotechnique SA, Bienne

Prospection d'eau souterraine par forages profonds dans le Vallon de St-Imier





Direction:

Office de l'économie hydraulique et énergétique du Canton de Berne

Réalisation:

MFR Géologie-Géotechnique SA, Bienne

Rannort:

Prospection d'eau souterraine par forages profonds dans le Vallon de St-Imier

Edition: 1998

Editeur:

Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne (OEHE) Section Géologie

Direction:

G. della Valle, dr ès sc.

Réalisation:

MFR Géologie-Géotechnique SA, Bienne, Ch. Rieben, P. Adatte

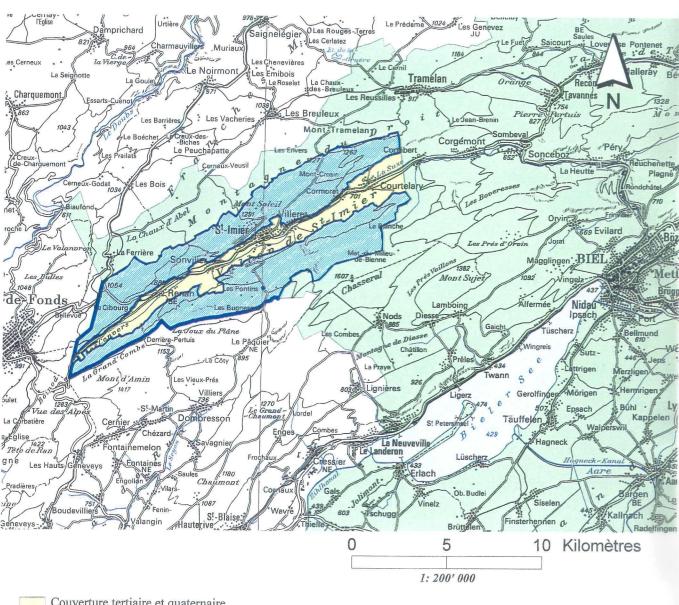
Impression et reliure:

Peter Gaffuri AG, Berne

Le présent rapport constitue uniquement une base décisionnelle qui ne préjuge en aucun cas des décisions rendues par les organes politiques compétents.

La reproduction et l'utilisation ultérieure de textes, graphiques, extraits de cartes et autres sont autorisées à condition de mentionner les indications bibliographiques.

Situation d'ensemble



Couverture tertiaire et quaternaire

Bassin d'alimentation karstique du haut vallon de St-Imier en territoire bernois

Données cartographiques : PK 200 @ 1996 , Office fédéral de topographie

Vallon de St-Imier, vue aérienne vers le Sud-Ouest, depuis St-Imier en direction de Sonvilier (milieu de la photo) où se trouvent les forages profonds $SON\ 1+2$ (photo: Ch. Rieben, MFR SA, Bienne)



TABLES DES MATIERES

	Page
Situation d'ensemble	3
Vallon de St-Imier, vue aérienne en direction SW	4
RESUME	8
ZUSAMMENFASSUNG	9
1. INTRODUCTION	11
1.1 JUSTIFICATION DE L'ETUDE	11
1.2 BUTS	11
1.3 ORGANISATION - FINANCEMENT	12
1.4 INTERVENANTS	12
1.5 REMERCIEMENTS	12
2. SECTEUR D'ETUDE	13
2.1 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE	13
2.2 CADRE GEOLOGIQUE GENERAL	
2.2.1 Introduction	13
2.2.2 Description des couches géologiques	
2.3 CADRE HYDROGEOLOGIQUE	15
2.3.1 Types d'aquifères	15
2.3.2 Description succincte de l'hydrogéologie du haut-vallon	
2.3.3 Travaux antérieurs	17

	Page
3. RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE	19
3.1 BUTS	19
3.2 METHODE ET DISPOSITIF DE MESURES	19
3.3 INTERPRETATION	21
3.3.1 Profil SV1 (SW-NE):	
3.3.2 Profil SV2 (SE-NW):	25
3.4 APPORTS DE LA CAMPAGNE DE SISMIQUE REFLEXION	26
4. EXECUTION DES FORAGES PROFONDS	29
4.1 INTRODUCTION	29
4.2 DONNEES GEOLOGIQUES	29
4.3 DONNEES HYDROGEOLOGIQUES	
4.3.1 Principaux résultats des diagraphies	
4.3.2 Essais de puits	
4.3.3 Essais de pompage de longue durée	37
4.3.4 Calcul de la perméabilité des puits	38
4.3.5 Aspects qualitatifs	42
4.3.6 Comparaison de la composition chimique des eaux du vallon	
4.3.7 Potabilité de la ressource	46
4.3.8 Analyses isotopiques	47
4.3.9 Ressources et perspectives d'exploitation	48
5. MODELE REGIONAL	49
5.1 GEOLOGIE	49
5.2 HYDROGEOLOGIE	49
6 CONCLUSION	51

LISTE DES FIGURES, DES TABLEAUX ET ANNEXES

Figure	1:	situation géographique et zone d'étude	.14
Figure	2:	colonne lithostratigraphique simplifiée du haut-vallon	.16
Figure	3:	localisation des sources constituant l'exutoire régional de Cormoret	.18
Figure	4:	localisation des profils sismiques et des forages profonds	20
Figure	5:	profil SV1, interprétation du stack temps	.23
Figure	6:	profil SV2, interprétation du stack temps	27
Figure	7:	relevés lithostratigraphiques schématiques des forages	30
Figure	8:	forage SON1, essais par paliers et courbes caractéristiques	34
Figure	9:	forage SON2, essais par paliers et courbes caractéristiques	35
Figure	10:	essais de pompage de longue durée	39
Figure	11:	forage SON1, calcul des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère	40
Figure	12:	forage SON2, calcul des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère	41
Figure	13:	analyses chimiques des points d'eau	44
Figure	14:	analyses chimiques des points d'eau	45
Figure	15:	coupe géologique de la région des forages SON1 et SON2	50
Tableau	ı 1:	caractéristiques sismiques moyennes des formations géologiques	22
Tableau	1 2:	diamètres de forage et équipements	29
Tableau	1 3:	profondeurs et répartition des débits pompés dans les forages avant acidification	33
Photo	:	travaux de forage sur le site des Sauges (SON1)	52
		coupe géologique 1 :1000 du forage SON1 (Les Sauges)	
		coupe géologique 1 :1000 du forage SON2	
		analyses chimiques, données brutes	
Annexe	4:	bibliographie	58
Dossier	: ph	otographique des cuttings des forages SON1 et SON2 : voir WEA/Geolog	gie,
TT 1	1	anisaha Dalmanantatian (IIDOV) dan Vantana Daman	

«Hydrogeologische Dokumentation (HDOK) des Kantons Bern »

RESUME

L'alimentation en eau potable des communes situées dans le haut-vallon de St-Imier est régulièrement perturbée par des problèmes non seulement de qualité, mais aussi temporairement de quantité. C'est dans ce cadre qu'un programme de prospection des eaux souterraines profondes a été défini en 1993 et exécuté entre 1995 et 1998. Cette recherche s'est développée en deux phases principales, soit une phase de travaux prospectifs de surface et du sous-sol, incluant la mise en œuvre d'une campagne de sismique-réflexion et, en seconde phase, l'exécution de deux forages profonds de reconnaissance.

La campagne de reconnaissance du sous-sol par sismique-réflexion a eu lieu en septembre 1996. Deux profils d'une longueur totale de 2910 mètres ont couvert le secteur situé à l'Est du village de Sonvilier. Ces mesures ont permis de préciser le modèle géologique et structural de ce secteur, de mettre en évidence des zones de fractures et d'optimiser les emplacements des deux forages de reconnaissance.

L'exécution des travaux de forages a débuté en août 97 et s'est terminée en janvier 1998. Les deux ouvrages, profonds de 666.6 et 580.0 mètres, ont confirmé les prévisions géologiques initiales et ont mis en évidence une importante nappe karstique artésienne dans l'aquifère du Malm. Au forage des « Sauges » (SON1), le débit testé exploitable à long terme est de 1350 l/min pour un rabattement inférieur à 20 mètres. Sur le site de la « Fin du Tilleul » (SON2), c'est un débit de 1100 l/min qui a été pompé en continu pendant trois semaines avec un rabattement stabilisé inférieur à 50 m.

Ces deux sites offrent donc un énorme potentiel hydraulique de plusieurs milliers de l/min qui pourrait être mis en valeur par un ou deux puits d'exploitation de gros diamètre.

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux découvertes sont excellentes, puisque les analyses n'ont pas permis de détecter de polluants d'origine anthropogène. Du point de vue bactériologique, de probables contaminations par l'eau de forage ont influencé négativement les analyses. Aucune conclusion définitive ne peut donc être tirée à ce sujet pour le moment.

L'origine des eaux découvertes par cette prospection est assez différenciée. Le forage des « Sauges » (SON1) présente une eau relativement vieille, alors que celle du forage de la « Fin du Tilleul » (SON2) est le résultat d'un mélange avec des eaux jeunes, voire actuelles. Ces caractéristiques ressortent tant du point de vue chimique qu'isotopique.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Wasserversorgungen der Gemeinden im oberen Sankt-Immertal kennen immer wiederkehrende Qualitäts- und Quantitäts-Probleme. Aus diesem Grunde wurde 1993 ein Untersuchungsprogramm zur Grundwasserprospektion in den tiefen Karstbereichen erstellt. Die Arbeiten wurden von 1995 bis 1998 in zwei Etappen durchgeführt: die erste Etappe umfasste Oberflächen- und reflexionsseismische Untersuchungen, während der zweiten Phase wurden zwei Sondierbohrungen abgeteuft.

Die im November 1996 über zwei Profile von gesamthaft 2910 m Länge im Osten von Sonvilier durchgeführten reflexionsseismischen Untersuchungen, lieferten detaillierte Kenntnisse über den geologischen und tektonischen Aufbau des Gebietes sowie über die Zerklüftungszonen und erlaubten eine genaue Plazierung der zwei Sondierbohrungen.

Die Bohrarbeiten (August 1997 bis Januar 1998) bestätigten die geologischen Prognosen und erlaubten den Nachweis eines bedeutenden artesischen Grundwasservorkommens im Malmaquifer. In der Bohrung «Les Sauges» (SON1, 666.6 m) konnten im Langzeitpumpversuch 1350 l/min bei einer Absenkung von weniger als 20m gefördert werden. In der Bohrung «La Fin du Tilleul» (SON2, 580 m) konnten während ein Langzeitpumpversuches von drei Wochen 1100 l/min bei einer Absenkung von weniger als 50m gefördert werden.

Die beide Standorte bieten ein riesiges hydraulisches Potential von mehreren Tausend I/min an, die in einem oder zwei Brunnen grösseren Durchmessers gefördet werden könnten.

Physikalisch und chemisch ist das Wasser beider Bohrungen einwandfrei: es waren keine Anzeichen anthropogener Verunreinigungen festzustellen. Es ist jedoch anzunehmen, dass das Grundwasser durch das verwendete Spülwasser bakteriologisch verunreinigt wurde. Es kann deshalb in dieser Hinsicht im Moment keine Beurteilung erfolgen.

Das Wasser beider Bohrungen ist nicht genau gleichen Ursprungs: dasjenige der Bohrung von «Les Sauges » (SON1) ist relativ alt, wogegen das der Bohrung «Fin du Tilleul » (SON2) mit jungem Wasser vermischt sein muss. Dies lässt sich aus den Resultaten der chemischen wie auch der Isotopen-Analysen schliessen.

1. INTRODUCTION

1.1 JUSTIFICATION DE L'ETUDE

Dans le canton de Berne, les eaux souterraines en général sont soumises au droit régalien de l'Etat. En temps que "propriétaire" et selon l'article 3 de la nouvelle loi cantonale sur l'alimentation en eau (LAEE) du 11 novembre 1996, l'Etat se doit de recueillir les données hydrogéologiques en vue du captage d'eau et de la protection des eaux souterraines.

Dans le vallon de St-Imier, une étude intitulée "Hydrogéologie du vallon de St-Imier" et publiée en 1981 par l'OEHE a permis d'acquérir les connaissances de base de l'hydrogéologie locale, caractérisée principalement par la prédominance des aquifères karstiques. De nombreuses mesures de pluviométrie et de débit des exutoires ont permis d'établir un bilan du bassin versant constitué par le haut-vallon. Une des conclusions principales de ces investigations a été la mise en évidence d'un important flux d'eau souterraine dans l'aquifère des calcaires du Malm, en amont de l'exutoire karstique régional de Cormoret.

Sur la base de ce constat et suite aux problèmes qualitatifs et parfois quantitatifs rencontrés par les communes du haut-vallon, M. G. della Valle, géologue cantonal à l'OEHE, a mandaté le bureau MFR Géologie-Géotechnique SA à Bienne pour définir et exécuter une prospection d'eau souterraine par forages profonds dans cette région.

1.2 BUTS

Cette prospection a pour objectif principal la mise en évidence des ressources en eau souterraine de l'aquifère karstique du Malm dans le haut-vallon de St-Imier. En cas de succès, une alternative serait ainsi disponible à proximité pour les communes concernées (Renan, Sonvilier et St-Imier).

Aucun objectif de quantité n'a été défini préalablement. L'équipement des forages de reconnaissance devait toutefois permettre d'installer une pompe immergée capable de débiter 1000 l/min.

Du point de vue qualitatif, les expériences positives enregistrées dans des projets similaires (Pontenet, Delémont) montrent l'importance d'une couche de protection de l'aquifère. Avec la présence attendue d'une couverture molassique peu perméable tapissant le fond du vallon, la qualité de la ressource devait être bonne, en tout cas meilleure que celle des sources karstiques exploitées par les communes.

D'autre part, pour la même raison, la nouvelle ressource devait présenter un degré de vulnérabilité bien moindre que les exutoires karstiques de surface.

1.3 ORGANISATION - FINANCEMENT

En 1993, le coût de l'ensemble du projet de recherche était estimé à Fr. 1'300'000.--. Le Grand Conseil du canton de Berne acceptait en mars 1995 d'engager ce montant. Toutefois, il a posé comme condition que les investigations scientifiques soient précédées par des recherches dites "alternatives". Un sourcier a donc exécuté une dizaine de forages de 40 à 90 m de profondeur à St-Imier. Ces forages, pris isolément ou en groupe, n'ont répondu ni quantitativement ni qualitativement aux promesses du sourcier.

Malheureusement, ces travaux ont amputé de plus de Fr. 240'000.- le crédit d'engagement pour le projet exposé dans ce rapport. Mais en adaptant le programme des reconnaissances et grâce à des offres de forage avantageuses, il a été possible de limiter le crédit supplémentaire nécessaire à Fr. 60'000.-.

1.4 INTERVENANTS

Plusieurs entreprises ont œuvré à la réussite de cette recherche :

- MFR Géologie-Géotechnique SA est l'auteur du projet et a assuré la direction des travaux tant sismiques que de forages. Deux consultants nous ont assistés:
 - M. Ph. Bodmer, géologue à Ennetbürgen;
 - M. B.-F. Iseli, géologue à Effretikon.
- La campagne de sismique-réflexion a été réalisée et traitée par l'entreprise **GeoExpert AG** à Schwerzenbach (M. W. Frei).
- Foralith AG à Gossau a exécuté les travaux de forages et de pompages.
- Geotest AG à Zollikofen a réalisé les diagraphies de forages.

1.5 REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier ici M. Jörg Frei, ingénieur en chef de l'OEHE.

Notre gratitude va tout particulièrement à M. Gianni della Valle, géologue cantonal (OEHE), pour son soutien. Nous exprimons également nos remerciements aux communes de Sonvilier et de St-Imier pour leur collaboration.

Enfin, nous tenons également à remercier tous les intervenants qui ont contribués à la réussite de ce projet, en particulier nos deux consultants.

2. SECTEUR D'ETUDE

2.1 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE

Pour des questions de proximité entre la « zone de production » et les consommateurs, afin que les coûts d'adduction restent le plus bas possible, cette prospection s'est centrée sur le haut-vallon, en amont de St-Imier. Toutefois, le secteur d'étude est beaucoup plus large, puisqu'il s'étend entre les Convers (1200 mètres d'altitude) et Cormoret (700 mètres) : il correspond au bassin versant supérieur de la Suze et au bassin d'alimentation de l'exutoire régional des eaux souterraines, constitué par les sources karstiques de Cormoret. Géographiquement, il est limité par (figure 1):

- a) les crêtes de la montagne du Droit au Nord (la Cibourg, Mt-Soleil, Mt-Crosin);
- b) la limite entre les bassins d'alimentation des sources de Cormoret et celles de Sonceboz à l'Est. Cette ligne d'orientation NE-SW passe approximativement entre Courtelary et Cortébert;
- c) les crêtes du Petit Chasseral, de la Joux du Plane et du Mont d'Amin au Sud;
- d) la crête séparant le vallon de St-Imier et la vallée de la Sagne à l'Ouest et qui correspond à la frontière entre les cantons de Berne et de Neuchâtel.

2.2 CADRE GEOLOGIQUE GENERAL

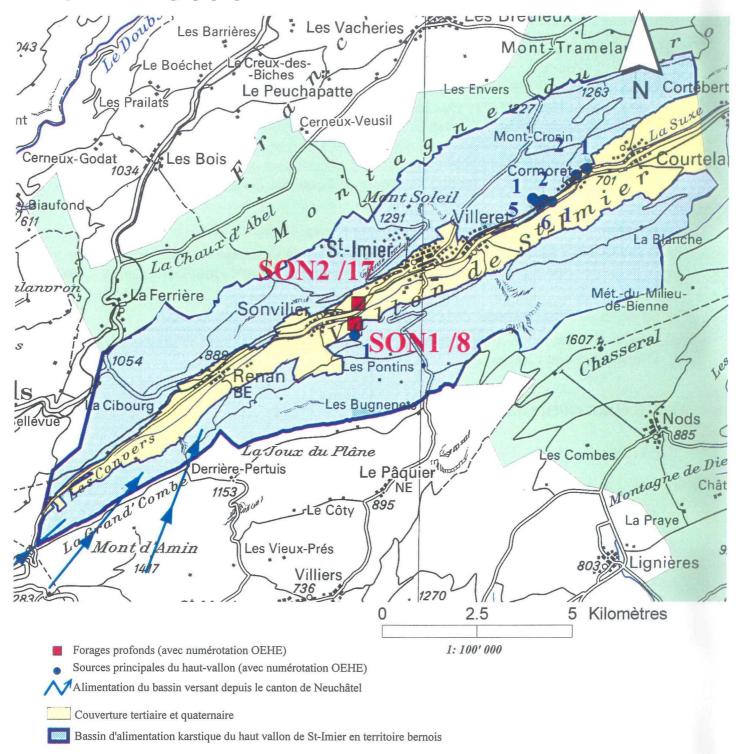
2.2.1 Introduction

Le vallon de St-Imier est formé par un synclinal d'axe NE – SW, relativement étroit des Convers à Cormoret, puis devenant beaucoup plus large à partir de Courtelary. Ce synclinal est bordé par les chaînes anticlinales chevauchantes de la Montagne du Droit au Nord et du Chasseral au Sud. A l'Ouest, le vallon est interrompu par le décrochement régional de la Ferrière.

Le fond du vallon est tapissé par une épaisseur variable de molasse tertiaire peu perméable et diverses formations quaternaires peu développées. Les flancs sont constitués par les calcaires et marnes du Crétacé inférieur et du Malm supérieur.

L'axe du synclinal est décalé vers le Sud en raison du chevauchement de la molasse tertiaire par les calcaires de l'anticlinorium du Chasseral. Dans la haut-vallon, il plonge vers l'Est, puis se relève vers Cormoret où les calcaires du Malm supérieur affleurent le long de la Suze.

Figure 1: situation géographique et zone d'étude



Données cartographiques : PK 200 © 1996, Office fédéral de topographie

2.2.2 Description des couches géologiques

Les principales formations géologiques présentes sont (figure 2) :

- le Quaternaire: dans la région, cette formation est peu épaisse (< 25 m). Elle est représentée par des matériaux meubles localement aquifères, principalement des dépôts fluvio-glaciaires et des éboulis de pente;
- le Tertiaire: les formations tertiaires sont représentées essentiellement par des marnes. Elles peuvent atteindre plus de 150 mètres d'épaisseur. Globalement peu perméable, cette molasse contient fréquemment des niveaux pluri-métriques de grès et de calcaires lacustres faiblement aquifères;
- le Crétacé: il peut dépasser 50 mètres d'épaisseur dans la région étudiée. Le Crétacé est constitué de haut en bas par les formations de l'Hauterivien (Pierre Jaune, Marnes Bleues d'Hauterive) puis par les calcaires du Valanginien (Calcaire Roux Sableux, Marbre Bâtard);
- le Malm supérieur: il débute par les marno-calcaires du Purbeckien et se poursuit par l'épaisse série principalement calcaire du Portlandien, du Kimméridgien et du Séquanien. La puissance totale du Malm sup. est de l'ordre de 400 mètres. Il s'agit du principal aquifère régional et constitue de ce fait la cible de cette prospection;
- *l'Argovien*: il s'agit principalement de marnes et de marno-calcaires dont l'épaisseur est d'environ 150 mètres. L'Argovien est considéré comme un aquiclude et constitue théoriquement la base peu perméable de l'aquifère du Malm supérieur;
- le Dogger: ces calcaires, dont l'épaisseur avoisine les 180 mètres, n'affleurent pas dans le synclinal de St-Imier. Ils sont limités à la base par les marnes aquicludes de l'Aalénien.

2.3 CADRE HYDROGEOLOGIQUE

2.3.1 Types d'aquifères

Deux types d'aquifères sont présents dans la région étudiée. Il s'agit:

- des aquifères karstiques, constitués par des conduits à forte perméabilité (K> 10⁻¹ m/s) et des blocs fissurés moins perméables (10⁻⁵ à 10⁻⁷ m/s). Dans la région de St-Imier, la série calcaire du Malm, épaisse de près de 400 m, constitue l'aquifère régional principal. Il apparaît dans deux configurations :
 - majoritairement sub-affleurant ou affleurant sur les flancs du synclinal, il est drainé par un réseau karstique bien développé. L'absence de couverture en surface explique le fort taux d'infiltration des précipitations, avec des temps de réponse souvent très rapides et une grande vulnérabilité;

Figure 2: colonne lithostratigraphique simplifiée du haut-vallon

Epaisseur (m)		Types de roches	Age	Aquifères principaux
0-25	ON 01 0	Limons, graviers	Quaternaire	
0 ->150		Marnes, calcaires lacustres	Tertiaire	
env. 60		Calcaires et marnes	Crétacé	
env. 130		Calcaires massifs	Purbeckien Portlandien	
env. 150		Calcaires massifs Kimmeridgien		
env. 130		Calcaires oolithiques Calcaires marneux	Séquanien	
env. 150		Marnes et marno-calcaires	Argovien	
env. 180		Calcaires massifs, oolithiques ou gréseux	Callovien Bathonien Bajocien	
		Marnes	Aalénien	

- au droit du synclinal, l'aquifère karstique du Malm est surmonté par une couverture imperméable importante (molasse tertiaire), d'où une protection très efficace contre toutes les atteintes provenant de la surface. Ces caractéristiques en font une cible privilégiée pour la prospection d'eau.
- des aquifères à porosité d'interstices: dans le haut-vallon, les aquifères poreux développés dans les formations tertiaires (molasse) et quaternaires (alluvions, éboulis de pente) sont très locaux et ne possèdent que de faibles ressources en eau, dont la qualité est fréquemment médiocre. A la limite orientale de la zone d'étude, on peut toutefois cité l'existence des puits du Syndicat pour l'alimentation des Franches-Montagnes en eau potable (SEF) qui prélèvent l'eau de la nappe alluviale de la Suze à Courtelary.

2.3.2 Description succincte de l'hydrogéologie du haut-vallon

L'hydrogéologie du haut-vallon de St-Imier est marquée par la présence d'importantes sources karstiques à Cormoret (Grande et Petite Doux, sources intermédiaires de la Doux, le Torrent, la Raissette, la Borcairde, voir figures 1 et 3). L'émergence de ces sources à cet endroit coïncide avec l'affleurement des calcaires du Malm supérieur le long de la Suze. Le débit cumulé de cet ensemble varie entre 1 m³/s en étiage et plus de 12 m³/s en crue. Le bassin d'alimentation correspondant présente une superficie de l'ordre de 100 à 120 km². A l'Ouest, il s'étend probablement vers la vallée de la Sagne.

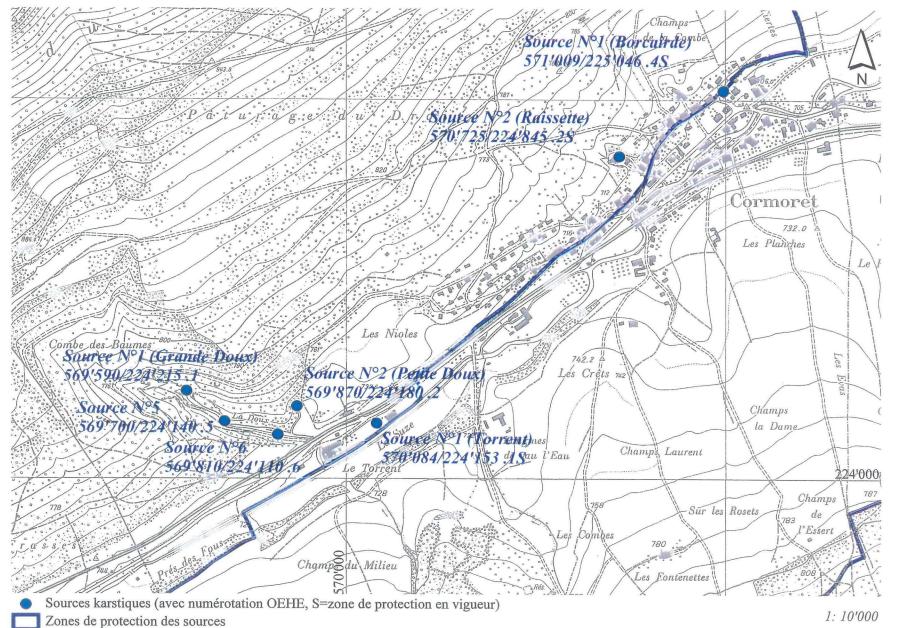
Plusieurs essais de traçage ont montré que les 2 flancs du synclinal du vallon de St-Imier participent à l'alimentation de ces sources. Il existe donc une ou plusieurs liaisons hydrauliques profondes à travers le synclinal mettant en relation le flanc Sud avec le flanc Nord où se situent les exutoires.

Parallèlement à ce système d'écoulement régional existent plusieurs points d'eau secondaires en amont de Cormoret, qui sont pour la plupart disposés le long de la ligne de chevauchement du flanc Sud du synclinal. La plus importante est la source karstique de l'Erguel (figure 4), dont le débit varie très fortement de quelques l/s en étiage à plus de 100 l/s en crue.

2.3.3 Travaux antérieurs

La principale étude régionale a été effectuée sous la direction de l'OEHE à la fin des années 70. De nombreuses mesures de précipitations et d'écoulements durant plusieurs cycles hydrologiques ont permis de dresser un bilan hydraulique du vallon de St-Imier.

Cette étude a principalement démontré l'existence d'un important déficit d'écoulement de la Suze par rapport à son bassin versant à la hauteur des stations de jaugeage de Sonvilier et de Villeret. Par contre, en aval de la restitution des sources karstiques de Cormoret, le bilan entre précipitations et écoulement de la rivière s'équilibre. Ces mesures ont donc permis d'évaluer la ressource en eau souterraine s'écoulant dans le haut-vallon, de l'ordre de 1 à 1.5 m³/s à la hauteur de Sonvilier et de 1.2 à 1.8 m³/s vers Villeret.



3. RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE

3.1 BUTS

L'objectif principal de la campagne géophysique était d'apporter les éléments nécessaires à la détermination des emplacements des deux forages verticaux et de leurs caractéristiques (profondeur, équipement, etc). Les éléments suivants devaient être précisés:

- identification de la structure et de la géométrie du synclinal de St-Imier;
- mise en évidence ou confirmation de la présence de chevauchements en bordure du synclinal;
- mise en évidence d'accidents et de zones fracturées dans les calcaires du Malm;
- évaluation de l'épaisseur de la couverture tertiaire et quaternaire;
- estimation de la profondeur et de l'épaisseur des principales unités géologiques secondaires (Crétacé, Malm, Argovien, Dogger).

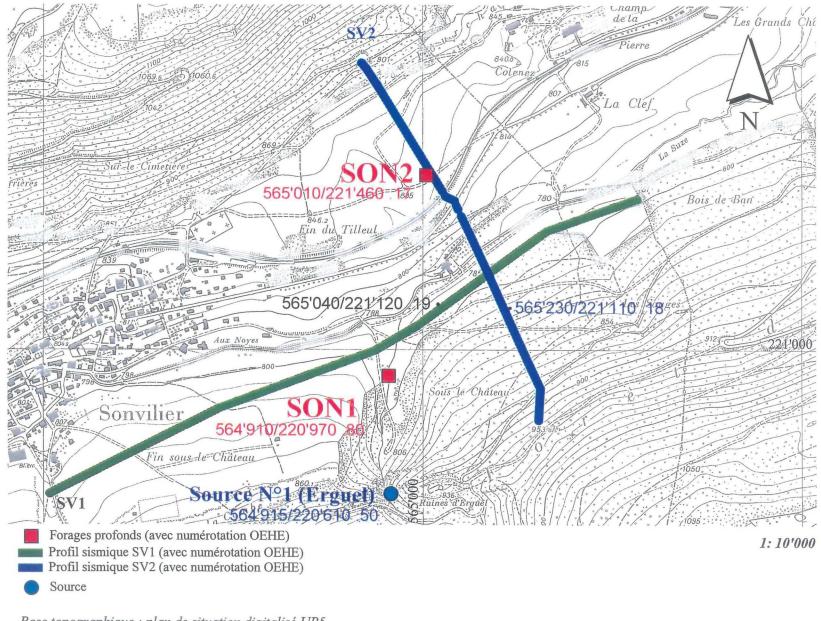
3.2 METHODE ET DISPOSITIF DE MESURES

Le projet prévoyait au départ que les forages seraient exécutés jusqu'au contact Séquanien-Argovien, estimé à 650 m de profondeur. Compte tenu des renseignements recherchés, le choix de la méthode géophysique s'est porté sur la sismique-réflexion.

Les mesures ont été effectuées le long de 2 profils disposés en croix (voir figure 4), d'une longueur totale de 2910 mètres. Le profil SV1 était parallèle à l'axe du synclinal, tandis que le profil SV2 était perpendiculaire à cet axe.

169 points de tir, profonds de 2 m et espacés de 20 m, ont été chargés et mis à feu. Les stations réceptrices, au nombre de 291, étaient disposées tous les 10 m. L'enregistrement des données s'est effectué sur 144 canaux. L'ensemble de la campagne s'est déroulé du 9 au 19 septembre 1996.

Les mesures et le traitement des données ont été confiés à l'entreprise GeoExpert AG, Schwerzenbach, suite à un appel d'offres international.



Base topographique : plan de situation digitalisé UP5

3.3 INTERPRETATION

Plusieurs réflecteurs ont été mis en évidence. Nous avons choisi le profil SV1 entre les CDP 130 et 140 pour décrire la succession des principaux réflecteurs identifiables (figure 5). Il existe globalement 3 zones distinctes, séparées par deux groupes de réflecteurs principaux:

- le premier groupe est composé de 2 réflecteurs continus et bien marqués entre 0.15 et 0.2 seconde (s). Ils signalent la limite entre les formations tertiaires et les calcaires (Crétacé et surtout Malm);
- le second groupe est formé de 3 horizons situés entre 0.43 et 0.5 s, continus et bien marqués. Ces réflecteurs sont caractéristiques des calcaires du Dogger. Ils ont déjà été observés lors des campagnes de sismique-réflexion effectuées dans le canton de Neuchâtel.

3.3.1 Profil SV1 (SW-NE)

Ce profil est parallèle à l'axe du synclinal et donc moins perturbé par la tectonique. Plusieurs points peuvent être relevés à son sujet:

- les deux groupes de réflecteurs principaux sont clairement identifiables sur l'ensemble du profil SV1. Ils présentent un faible pendage vers l'Ouest (voir figure 5);
- entre la surface et le premier groupe de réflecteurs (Malm et Crétacé), plusieurs horizons discontinus et ondulés ont été mis en évidence. Ils ont été attribués au Tertiaire. L'aspect de ces réflecteurs sur le stack est expliqué par la présence probable de plis de la molasse;
- le premier groupe de réflecteurs (0.15 et 0.2 s) marque la transition entre la molasse et les calcaires du Crétacé et du Malm. Plus en profondeur et jusqu'au deuxième groupe de réflecteurs, plusieurs horizons discontinus sont visibles. Ils correspondent à la transition progressive des calcaires du Malm supérieur vers les calcaires marneux de l'Argovien;
- enfin, par un interface relativement bien marqué sur le stack (diminution des vitesses), les calcaires du Dogger font place aux marnes de l'Aalénien.

Les épaisseurs calculées et les vitesses sismiques des diverses formations sont présentées au tableau 1. Ces valeurs sont recoupées par les observations géologiques de terrain et les mesures obtenues dans d'autres campagnes de sismique-réflexion effectuées dans le même contexte.

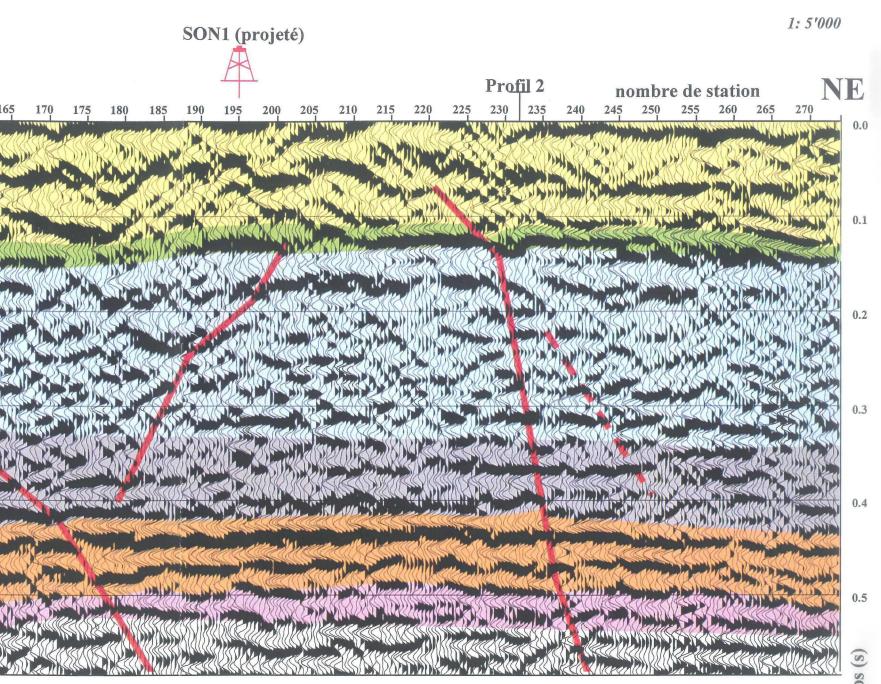
Tableau 1 : caractéristiques sismiques moyennes des formations géologiques.

Formations géologiques	Vitesses d'intervalle (m/s)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)
Quaternaire	2100	0 – 10	0 - 10
Tertiaire	2600	150-200	10 - 200
Crétacé	3100 - 3550	50	200 - 250
Malm supérieur	4400 - 4500	425	250 - 675
Argovien	. 3800 - 4300	175	675 - 850
Dogger	4900 - 5100	185	850 - 1035
Aalénien	3300 - 3500	-	> 1035

Plusieurs accidents peuvent être mis en évidence sur le profil SV1:

- entre les CDP 140 et 150, le deuxième réflecteur du Malm (0.1 s) montre un décalage très net. Cet accident se suit plus bas, dans le Dogger (CDP 180, 0.5 s);
- au CDP 190, on peut remarquer une hyperbole de diffraction bien marquée, visible dès 0.2 s. Elle est probablement causée par une structure peu profonde présente dans la molasse;
- 2 accidents traversent les réflecteurs du Malm sur toute leur épaisseur aux CDP 170 et 200;
- entre les CDP 220 (0.05 s) et 240 (0.5 s), un décalage affecte les réflecteurs du Malm et se poursuit dans le Dogger. Un peu plus à l'Est, une discontinuité de plus faible ampleur est également visible sur le stack.

SW





3.3.2 Profil SV2 (SE-NW)

Malgré les perturbations causées par le pendage des couches et la tectonique, l'interprétation du profil SV2 (figure 6) apporte des renseignements très importants sur la structure du synclinal. Les deux groupes d'horizons présents sur le profil SV1 apparaissent aussi sur le profil SV2, quoique de manière moins nette (Dogger p. ex). Par contre, les réflecteurs du premier groupe (limite molasse - calcaires) sont bien visibles. Quant à la géométrie du synclinal et la localisation des accidents tectoniques, ils sont également bien identifiables sur ce stack :

- le synclinal présente une structure complexe. Il est bordé au Sud par le chevauchement principal des calcaires (Crétacé et Malm) sur la molasse (CDP 135 à 110, entre 0.1 et 0.2 s). Cet accident est localement recouvert par des éboulis de pente. Un accident secondaire apparaît sur le stack SV2 (CDP 165 110, 0.12 -0.3 s). Il affecte aussi les calcaires du Malm. Enfin, la présence d'un rétro-charriage au Nord du profil n'est pas à exclure (CDP 195-205, 0.05 et 0.2 s);
- le synclinal peut être séparé en 3 zones :
 - a) la partie Sud est marquée par un saut très net des vitesses sismiques à faible profondeur. Cette limite n'est pas représentative du pendage réel des couches (subvertical), mais correspond au saut de vitesses existant entre les terrains de couverture (≈ 2600 m/s) et les calcaires du Malm (4500 m/s);
 - b) dans la partie centrale du profil, on observe que les calcaires (1er groupe de réflecteurs) possèdent un pendage vers le Sud qui peut être estimé après migration à environ 10°;
 - c) le flanc Nord du synclinal où les pendages élevés (> 50°) et la fin du profil de mesure ne permettent pas d'observations détaillées.
- une zone de failles peut être mise en évidence entre les CDP 185 -165. Au moins trois accidents sont visibles sur le stack. Le principal (CDP 165 à 185, 0.05 à 0.55 s) traverse les horizons jusque dans l'Aalénien. On observe des rejets significatifs, en particulier dans les calcaires du Malm. Le second croise le précédent au CDP 175 (0.023 s). Il induit aussi des décalages très nets dans les réflecteurs des calcaires du Crétacé et de la partie supérieure de ceux du Malm. Enfin, la troisième faille affecte les calcaires du Malm puis rejoint la faille principale dans les calcaires du Dogger (CDP 181, 0.4 s).

3.4 APPORTS DE LA CAMPAGNE DE SISMIQUE REFLEXION

La campagne de sismique-réflexion a permis de préciser des points essentiels pour la suite de la prospection:

- le contact entre la molasse tertiaire et les calcaires sous-jacents a parfaitement été identifié, ce qui a permis une bonne estimation de l'épaisseur des terrains de couverture le long des profils;
- l'ensemble des calcaires du Malm, soit du Portlandien (y.c. le Purbeckien) au Séquanien inférieur, présente une épaisseur de 425 m selon les calculs effectués à partir des données sismiques. Ce chiffre paraît élevé si on le compare aux épaisseurs mentionnées dans la plupart des documents existants (≈ 350 m). Le chevauchement présent au CDP 160 du profil SV2 ou une surestimation de la vitesse d'intervalle des calcaires du Malm pourraient être à l'origine de cette différence;
- sans le Séquanien inférieur plus marneux, l'épaisseur calculée des calcaires du Malm supérieur qui constituent la cible de cette prospection est de l'ordre de 350 mètres;
- la profondeur du toit des marnes argoviennes (limite inférieure de l'aquifère cible et profondeur maximale du forage) ne devrait pas dépasser 650 mètres comme prévu dans le programme initial;
- plusieurs accidents ont été mis en évidence tant sur le profil SV1 que sur le SV2. Ce sont en particulier les accidents présents aux CDP 170, 185 et 190 sur le profil SV2.

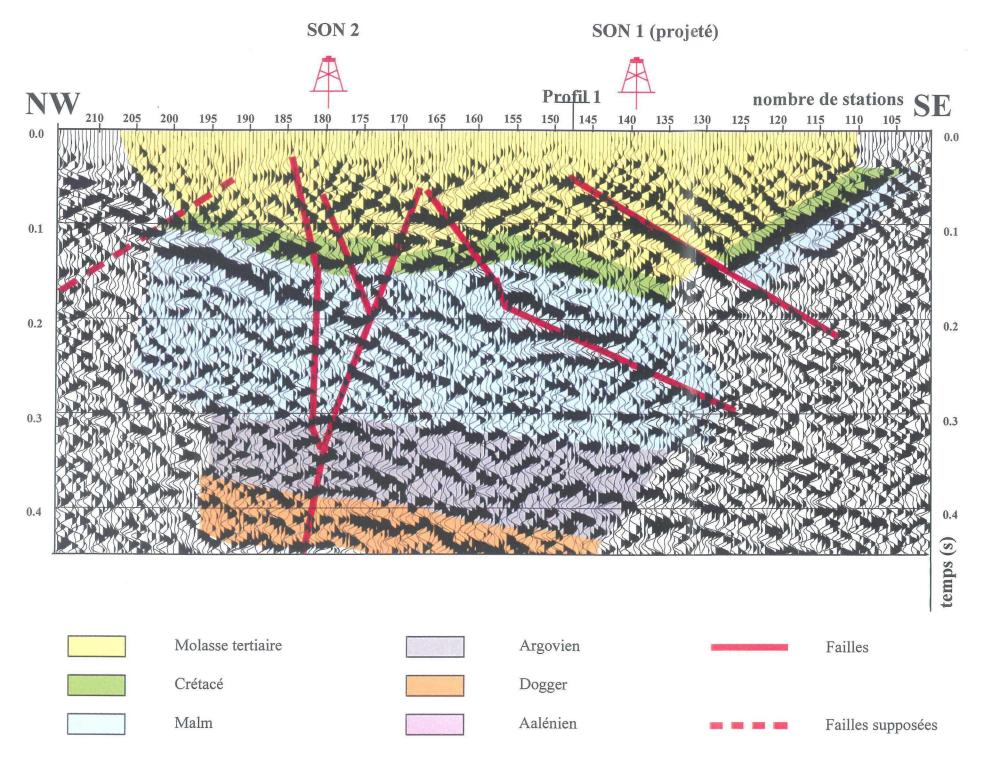
Ces résultats ont conduit à l'implantation des 2 sites de forages aux endroits suivants (fig. 4) :

• Site des Sauges :

forage SON1, à 800 m d'altitude environ, entre la Suze et la source de l'Erguël, immédiatement à la lisière de la forêt, sur la parcelle n° 631 de la commune de Sonvilier;

• Site de la Fin du Tilleul :

forage SON2, à 830 m d'altitude environ, au Nord de la route cantonale et de la voie CFF, sur la parcelle n° 269 de la commune de Sonvilier.



4. EXECUTION DES FORAGES PROFONDS

4.1 INTRODUCTION

Le projet a été établi sur la base de l'exécution de 2 forages destructifs de 650 m de profondeur chacun, tubés et cimentés jusqu'à 250 m, c'est-à-dire jusqu'à la limite entre le Purbeckien et les calcaires du Portlandien. Ce tronçon devant servir de chambre de pompage, le diamètre intérieur du casing a été fixé à 7", de manière à permettre l'installation d'une pompe immergée susceptible de refouler un débit de l'ordre de 1000 l/min.

Les options techniques choisies sont décrites dans le tableau 2.

Гаргеаи	2:	aiametres	ae	Jorage	eī	equipements.	

Profondeur	Formation géologique	Ø de forage	Equipement
0 -10 m	Quaternaire	121/4"	Casing 9 ⁵ / ₈ " cimenté
10 - 250 m	Tertiaire, Crétacé et Purbeckien	8 ¹ / ₂ "	Casing 7" cimenté
250 - 650 m	Malm	6 ¹ / ₄ "	Trou libre

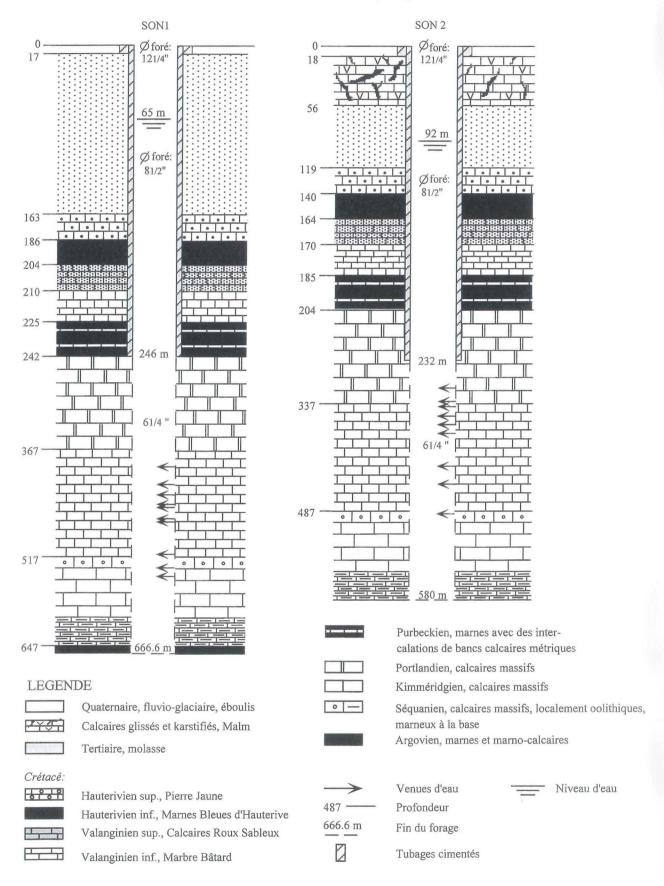
Suite à un appel d'offres international, les travaux ont été attribués à l'entreprise Foralith AG (Gossau). Ils ont eu lieu du 16 août au 10 septembre 1997 pour le forage SON1 et du 2 octobre au 5 novembre 1997 pour SON2.

4.2 DONNEES GEOLOGIQUES

Avec l'exécution des deux ouvrages, ce sont au total 1246.6 mètres qui ont été forés en mode rotary à la boue et à l'eau. Les levés ont été effectués sur la base de cuttings prélevés tous les mètres (figure 7). Les relevés de forage détaillés se trouvent aux annexes 1 et 2.

• Forage SON1: la profondeur du premier ouvrage est de 666.6 mètres. Aucune surprise géologique n'a été rencontrée par rapport aux prévisions. Après 17 mètres de quaternaire, le contact Molasse - Crétacé a été rencontré à 163 m de profondeur. Ensuite, après 62 mètres de Crétacé et 17 mètres de Purbeckien, le trou a été tubé et cimenté sur 244 mètres de profondeur. L'aquifère cible du Malm a été traversé sur 403 mètres. Enfin, de 647 à 666.6 m, les marno-calcaires de l'Argovien ont été forés afin de constituer le sac à boue de l'ouvrage.

Figure 7: relevés lithostratigraphiques schématiques des forages



De nombreuses pertes de fluide de plusieurs m³ ont été observées lors du percement des calcaires du Malm, en particulier ceux du Kimméridgien. Ces pertes furent les seuls indices de la présence de fracturation non colmatée dans le forage pendant la durée des travaux. Le relevé des cuttings n'a en effet pas permis de mettre en évidence la présence d'accidents tectoniques en raison de la taille des cuttings et de la nature peu variée des calcaires traversés (calcaire micritique).

- Forage SON2: la succession lithostratigraphique rencontrée dans cet ouvrage est pratiquement la même que celle du premier forage. Toutefois, la couverture quaternaire et tertiaire présente certaines différences :
 - des calcaires glissés et fortement fracturés, ont été recoupés entre 18 et 56 mètres de profondeur. La traversée de cette passe a engendré de telles pertes de fluide qu'il a été nécessaire de la cimenter avant de poursuivre plus loin les travaux;
 - la molasse s'est fortement amincie puisqu'elle ne mesure plus que 63 mètres d'épaisseur.

Ensuite, le forage s'est poursuivi à travers 66 mètres de Crétacé et 19 mètres de Purbeckien. Un casing a été cimenté jusqu'à 232 mètres de profondeur. Le Malm a ensuite été foré jusqu'au Séquanien inférieur à **580 mètres**.

La fracturation intense des calcaires du Malm a induit des pertes de fluide importantes lors du forage. A nouveau, le relevé des cuttings n'a pas permis de mettre en évidence des failles ou des fractures.

4.3 DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

Plusieurs étapes de mesures et de développement ont permis de tester les ouvrages et de collecter les données hydrogéologiques. La procédure adoptée pour les deux ouvrages était la suivante :

- nettoyage du trou de forage;
- 1^{er} essai de pompage de courte durée, par paliers successifs de débits ;
- exécution des diagraphies ;
- développement du puits par acidification ;
- 2ème essai de pompage de courte durée, par paliers successifs de débits ;
- essai de pompage de longue durée au débit maximum.

4.3.1 Principaux résultats des diagraphies

Dans le cas présent, deux dispositifs de mesures en continu ont été utilisés, soit :

- le diamétreur, qui permet de mesurer les variations de largeur d'un forage dans deux directions perpendiculaires ;
- le moulinet (flowmètre) qui mesure la vitesse d'écoulement de l'eau dans le forage.

L'utilisation complémentaire de ces deux outils a permis de localiser les fissures productrices et d'en quantifier les apports. Ces résultats ont permis d'optimiser les opérations de développement des deux puits par acidification.

Les mesures ont été effectuées par l'entreprise Geotest AG le 16 septembre pour le premier ouvrage et le 9 décembre 1997 pour le second. Les résultats des mesures se trouvent au tableau 3, les valeurs brutes aux annexes 1 et 2.

Il est intéressant de noter que les principales arrivées d'eau sont localisées dans le Kimméridgien, tant pour le forage SON1 (87 % du débit) que pour SON2 (57 %). Il est étonnant de relever la faible part délivrée par les calcaires oolithiques du Séquanien (13 et 7 %). Enfin, avec 36 % du débit, le Portlandien prend une part substantielle dans l'alimentation de SON2 alors qu'il est totalement improductif dans SON1.

Les mesures de moulinet et de calibreur confirment la dualité du karst. En effet, les venues d'eau proviennent de zones fissurées extrêmement localisées dont l'épaisseur cumulée est inférieure à 40 m pour chacun des puits. La majeure partie de l'aquifère du Malm, soit 90 % de l'épaisseur totale, est donc constituée de calcaires massifs improductifs.

Suite à ces résultats, 3 passes au SON1 et 4 passes au SON2 ont été acidifiées à l'acide chlorhydrique (HCl 20%). L'intérêt de cette méthode est que l'acide présente un très fort pouvoir de dissolution vis-à-vis des calcaires. La technique d'injection utilisée a permis que l'acide soit envoyé au droit des zones fissurées et qu'il soit poussé à l'intérieur des karsts.

Tableau 3: profondeurs et répartition des débits pompés dans les forages avant acidification.

Forage SON1	Débit:	320 l/min	Forage SON2	Débit:	320 l/min
Profondeur (m)	% débit	Formation	Profondeur (m)	% débit	Formation
383-388	6	Kimméridgien	236-239	2	Portlandien
409-414	4	Kimméridgien	295.5-297.5	29	Portlandien
426	13	Kimméridgien	328-330	5	Portlandien
433-439	16	Kimméridgien	335-344	21	Kimméridgien
441	13	Kimméridgien	352.5-353.5	19	Kimméridgien
458-459	13	Kimméridgien	377-379	3	Kimméridgien
462-462.5	19	Kimméridgien	388-389	11	Kimméridgien
511	3	Kimméridgien	415-420	1	Kimméridgien
517-530	4	Séquanien	466.5	2	Kimméridgien
531.5-532	5	Séquanien	488.5-493.5	7	Séquanien
541-542.5	4	Séquanien		THE PROPERTY OF THE PARTY OF TH	A STATE OF THE STA

4.3.2 Essais de puits

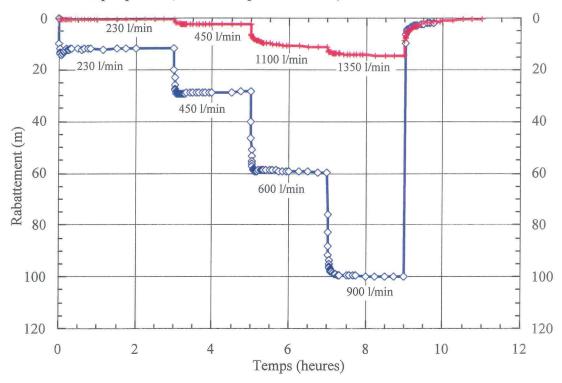
Les essais de pompage par paliers croissants de débit ont pour but l'évaluation des paramètres hydrauliques des ouvrages (pertes de charge, débit critique). Ils permettent de tracer les courbes caractéristiques des puits, et d'obtenir une première estimation des perméabilités. Chaque ouvrage a été testé avant et après l'acidification afin de contrôler l'efficacité du développement.

Il reste que les caractéristiques particulières du karst ne satisfont pas la plupart des conditions de base d'application des formules de calcul. C'est principalement du caractère inhomogène et anisotrope (dualité du karst) des aquifères karstiques dont il faut tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

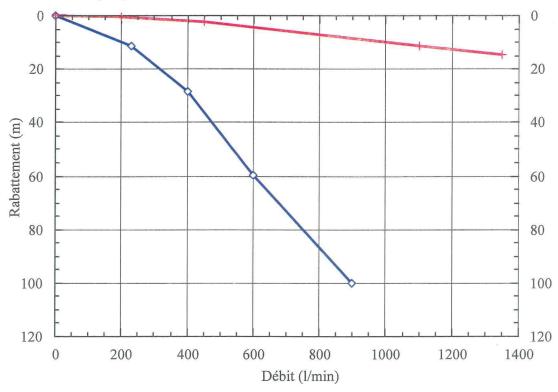
Le choix de la pompe était conditionné par le diamètre de la chambre de pompage (7"). Dans ces conditions, nous avons opté pour une pompe immergée 6" Grundfos SP60/20, dont le débit maximum possible est de l'ordre de 1350 l/min.

Figure 8: forage SON1, essais par paliers et courbes caractéristiques

Essais par paliers (courbes temps/rabattement)

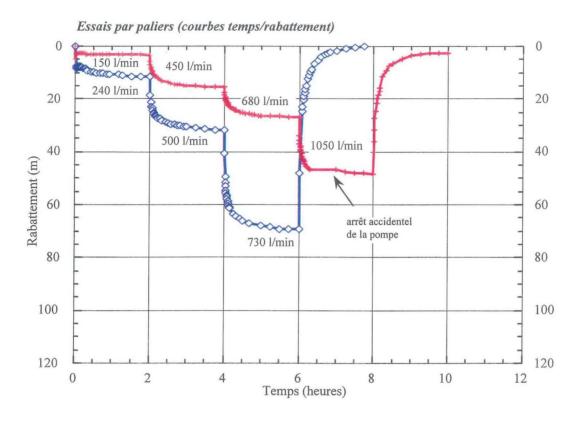


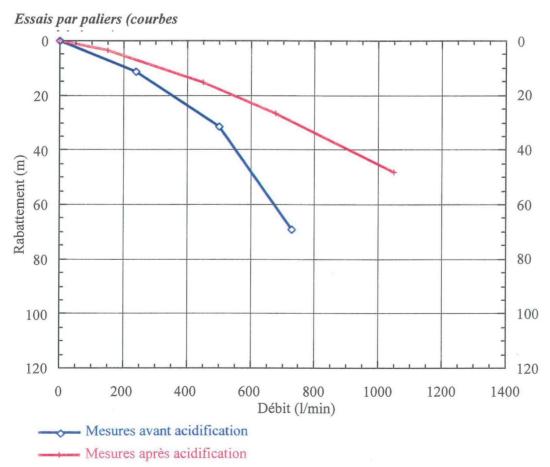
Essais par paliers (courbes caractéristiques)



Mesures avant acidification
Mesures après acidification

Figure 9: forage SON2, essai par paliers et courbes caractéristiques





• Puits SON1

Le premier essai par paliers a eu lieu le 16 septembre 1997 dans des conditions d'étiage. Quatre débits ont été pompés successivement, de 230 à 900 l/min. A chaque palier, le niveau piézométrique s'est stabilisé. A la fin de l'essai, la pompe a été arrêtée et la courbe de remonté mesurée. La même opération a été répétée après acidification avec des paliers jusqu'à 1350 l/min. Les résultats de ces essais sont présentés à la figure 8 :

- le niveau d'eau au repos était à une profondeur de 64.5 mètres, soit à 733 mètres d'altitude. Cette valeur est représentative de la moyenne des pressions des différentes fractures recoupées par le forage. Ce dernier étant tubé jusqu'à 244 mètres, la nappe est donc captive et sa charge dépasse 32 bars, car la première fissure productive est située à 385 mètres de profondeur;
- avant le développement du puits, il était possible de pomper un débit de 900 l/min avec un rabattement de 100 m environ. Après acidification, ce dernier était de 14.8 mètres pour un débit de 1350 l/min;
- la courbe caractéristique après développement indique que 1350 l/min peuvent être pompés sans que cela n'entraîne de pertes de charge quadratiques. Le débit critique du forage n'a de loin pas pu être atteint;
- la température de l'eau en tête de puits, de 20°C au premier palier de débit, s'est stabilisée à 18.5°C en fin d'essai. Cette variation pourrait indiquer une plus forte sollicitation des zones aquifères supérieures lorsque que le débit augmente;
- l'eau pompée est très rapidement devenue limpide après l'acidification.

• Puits SON2

Avant de procéder aux essais de pompage, un décolmatage préalable du puits a été nécessaire afin de remédier à la présence d'argiles dans les zones de fractures.

Le premier essai de pompage a été effectué le 10 décembre 1997, le second, après diagraphie et acidification, le 16 décembre. Le niveau de la nappe au repos était à 102.7 mètres de profondeur, soit à une altitude approximative de 732 m. Elle est donc captive, puisque le puits est tubé et cimenté jusqu'à 232 m. La première arrivée d'eau dans le forage étant localisée entre 236 et 239 mètres, la charge minimale est d'au moins 134 mètres. Cette valeur n'est pas représentative des niveaux piézométriques particuliers à chaque fracture recoupée par le forage, mais d'une moyenne sur l'ensemble de l'aquifère.

Les résultats des deux essais sont présentés à la figure 9. Ils ont été perturbés par d'importantes précipitations du 9 au 15 décembre, puisqu'il a été mesuré à la station ISM du Mt-Soleil 77.5 mm de pluies (figure 10).

L'acidification a permis une amélioration sensible des caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage et de sa productivité. Au premier essai, le débit maximum était de 730 l/min avec un rabattement de 69.4 m (profondeur 172.1 m). Il est monté à 1050 l/min au deuxième essai pour un rabattement de 48.3 m, soit un niveau stabilisé à 137 m de profondeur.

La température mesurée en tête de puits a relativement peu varié au cours de l'essai (0.5°C). Elle s'est stabilisée à 14.5°C durant le dernier palier de pompage.

4.3.3 Essais de pompage de longue durée

Ces essais sont une simulation en vraie grandeur d'une exploitation "normale" des puits (voir figure 10). Les renseignements collectés servent aussi à déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (perméabilité, transmissivité).

Les conditions hydrologiques qui ont régné à Sonvilier étaient très différentes d'un essai à l'autre. Le pompage SON1 a eu lieu en période d'étiage alors que le second essai a été fortement influencé par des précipitations.

• Puits SON1

- la durée des tests était de 23 jours, du 7 au 29 octobre 1997, avec un débit de **1350 l/min**, soit le maximum absolu de la capacité de la pompe;
- la stabilisation du rabattement est intervenue 12 heures après la mise en route de la pompe. Le niveau d'eau était alors à 81 mètres de profondeur, soit **un rabattement de 17 mètres** environ. Cette valeur est faible si l'on considère l'importance du débit pompé, le volume extrait durant l'essai (plus de 42'000 m³) et les conditions hydrologiques existantes (étiage);
- après stabilisation, le niveau piézométrique n'a plus varié qu'avec les précipitations tombées durant l'essai (60.4 mm à Mt-Soleil). Elles ont entraîné une remontée de près de 5 mètres. La nappe est ensuite redescendue à 81 mètres de profondeur;
- l'eau est restée absolument limpide du début à la fin de l'essai et sa température s'est stabilisée à 18.8°C.

Ces résultats permettent d'affirmer que cet ouvrage peut fournir au moins 1350 l/min à long terme, tout en induisant un rabattement inférieur à 20 mètres. Avec un ouvrage de plus grand diamètre, permettant l'installation d'une pompe de plus grande capacité, des débits bien supérieurs pourraient être extraits de l'aquifère à cet endroit.

• Puits SON2

- la stabilisation du niveau d'eau est intervenue après 24 heures de pompage, à environ 142 mètres de profondeur. Le rabattement était alors de 49 mètres. Durant les 22 jours d'essai, un débit jaugé à 1100 l/min a été atteint, ce qui représente un prélèvement total de 33'000 m³;
- l'essai a eu une influence sur le niveau piézométrique du forage SON1. En effet, il a été rabattu de 3.55 m après 24 heures de pompage;
- une fois stabilisé, le niveau piézométrique n'a varié qu'avec les précipitations : le 26 décembre, il était remonté de 21 m. Fait intéressant, les variations piézométriques des 2 forages ont été simultanées durant le test;
- après 1 jour de pompage, l'eau extraite était limpide jusqu'à la fin de l'essai. Sa température était de 14°C;

Le pompage de longue durée effectué au forage SON2 montre qu'un débit de 1100 l/min peut être exploité à long terme dans cet ouvrage avec un rabattement induit de l'ordre de 50 m. Tout comme le puits des Sauges, des débits bien supérieurs pourraient être prélevés de l'aquifère à cet endroit avec un ouvrage plus grand diamètre.

L'impact des précipitations sur l'état de charge de l'aquifère est important. Alors que le pompage de SON2 était en cours, la profondeur de la nappe au SON1 est passée de 62 mètres au début du pompage à 32 m le 27 décembre. Il n'est donc pas impossible que le SON1 soit jaillissant en période de forte crue.

4.3.4 Calcul de la perméabilité des puits

Le choix de la méthode de calcul des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère est limité par le fait qu'il ne soit pas homogène ni isotrope. Nous avons opté pour la méthode des écoulements transitoires avec représentations sur graphes semi-logarithmiques, dite méthode de l'approximation logarithmique selon Jacob. En l'absence de piézomètre à proximité des puits, il n'est pas possible de calculer directement le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.

Les courbes de descente et de remontée de chaque forage ont permis de calculer les transmissivités et par déduction les perméabilités de l'aquifère (figures 11 et 12). L'épaisseur de l'aquifère a été estimée à 350 mètres (Malm sans le Séquanien inférieur). Les perméabilités obtenues sont les suivantes :

 $SON1 : k = 3x10^{-6} \text{ m/s}$

 $SON2 : k = 5x10^{-7} \text{ m/s}$

Les résultats du calcul de ce paramètre en descente et en remontée correspondent bien. D'emblée, on relève que la perméabilité de l'aquifère au droit du forage SON1 est 6 fois supérieure à celle du forage SON2. 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 350 m d'épaisseur. En réalité, les zones productives totalisent moins de 40 m dans chaque ouvrage.

Dans les deux puits, le rabattement s'est très vite stabilisé, indiquant qu'un régime d'écoulement quasi permanent s'est installé. Cette observation est particulièrement réjouissante dans la mesure où elle traduit l'important potentiel hydraulique de l'aquifère. Le calcul de la perméabilité en régime permanent donne des valeurs supérieures d'un facteur 2 pour SON1 et d'un facteur 3 pour SON2 par rapport aux valeurs calculées ci-dessus en régime transitoire.

Figure 10 : essai de pompage de longue durée

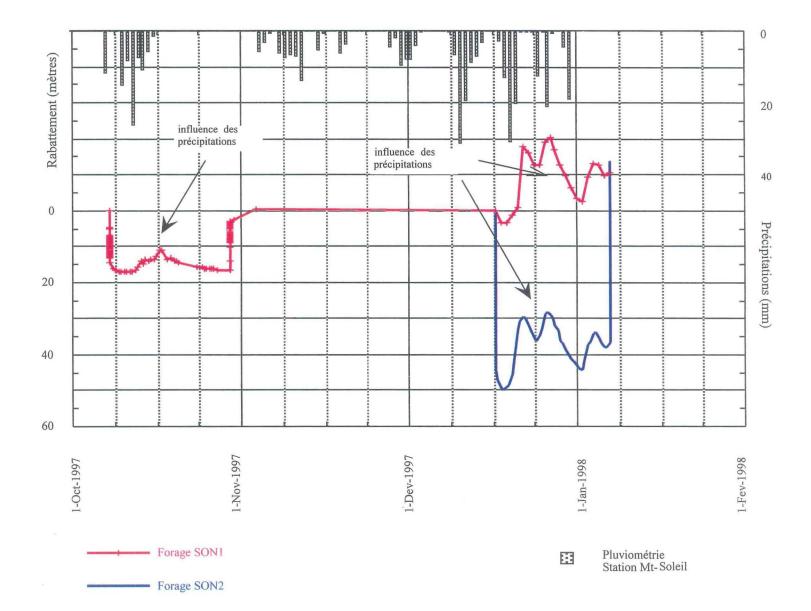
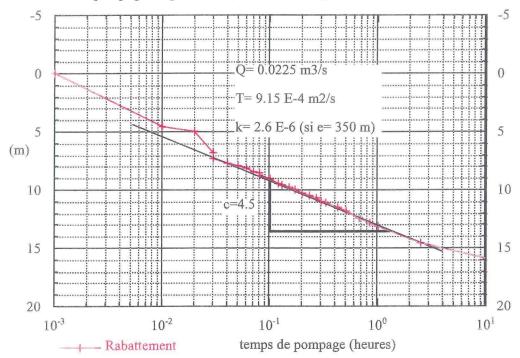
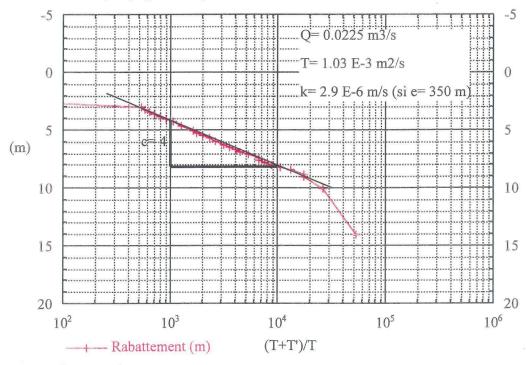


Figure 11: forage SON1, calcul des caractéristiques hydraulique de l'aquifère

SON1 pompage longue durée (Jacob descente)



SON1 pompage de longue durée (Jacob remontée)

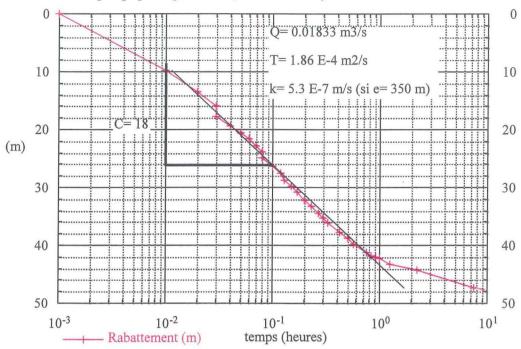


T = temps de pompage

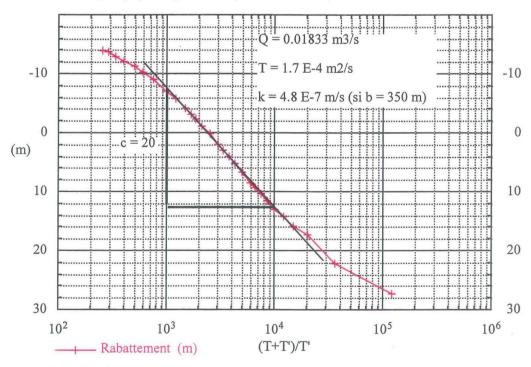
T' = temps depuis l'arrêt de pompage

Figure 12: forage SON1, calcul des caractéristiques hydraulique de l'aquifère

SON2 pompage longue durée (Jacob descente)



SON2 pompage longue durée (Jacob remontée)



T = temps de pompage

T' = temps depuis l'arrêt de pompage

4.3.5 Aspects qualitatifs

Durant les essais de pompage de longue durée, deux prélèvements d'échantillons d'eau ont été effectués en cours et en fin de pompage. Les analyses physico-chimiques et bactériologiques suivantes ont été confiées au laboratoire RWB SA à Porrentruy :

- les éléments majeurs et mineurs (ammonium, bicarbonates, calcium, chlorures, magnésium, nitrates, nitrites, phosphates, potassium, sodium, sulfates);
- la bactériologie (E. coli, les entérocoques, les germes totaux) ;
- les métaux lourds (nickel, cuivre, zinc, plomb, cadmium, mercure, fer total, manganèse, aluminium);
- les organochlorés;
- les hydrocarbures polyaromatiques (PAH);
- le benzène, toluène, éthylbenzène et xylène (BTEX).

Comme point de comparaison, les sources de Cormoret (Grande Doux, Raissette, Torrent) et la source de l'Erguël (au Sud du forage SON1) ont été également échantillonnées pour l'analyse des éléments majeurs et mineurs uniquement. D'autre part, nous avons utilisé deux analyses antérieures à cette prospection et représentant une source de la molasse et la Suze, tous deux à St-Imier. L'ensemble des résultats d'analyses sont rassemblés dans l'annexe 3. Sur les figures 13 et 14, les différents points d'eau sont reportés en fonction de la teneur totale en ions dissous (TDI) et de la teneur de chacun des éléments suivants : Ca, Mg, SO4, CL NO3. Les autres graphes illustrent les corrélations entre différents éléments (Na – Cl; Mg – Ca; Mg – Cl).

4.3.6 Comparaison de la composition chimique des eaux du vallon

La comparaison des caractéristiques physico-chimiques des eaux de fond avec celles des sources karstiques met en évidence des variations parfois significatives :

• La température

En pompage, les eaux des forages SON1 et SON2 sont relativement tempérées, respectivement 18.8°C et 14°C. Les zones productives du premier puits sont situées à des profondeurs plus importantes que celles du second puits, ce qui explique sans doute cette différence. Toutefois, ces températures sont relativement faibles, puisqu'elles devraient atteindre respectivement 22°C et 18°C avec un gradient moyen de 30°C/km. Pour mémoire, la température des sources de Cormoret est d'environ 8°C.

Minéralisation

La minéralisation des eaux des 2 forages est basse (conductivité $K_{25^{\circ}C}$: 400 - 450 μ S/cm; dureté totale : 22°f) en comparaison avec celles des sources karstiques de Cormoret ($K_{25^{\circ}C}$ > 450 μ S/cm).

En cours de pompage, ce paramètre est resté stable, alors qu'il a fortement varié aux sources karstiques entre les périodes de basses et hautes eaux. L'eau des forages est de type bicarbonaté calcique avec une forte composante magnésienne, surtout au puits SON1.

• Calcium - Magnésium

Ce sont deux éléments importants pour caractériser les eaux étudiées (figures 13 et 14). Si l'on excepte la Suze et la source molassique, on peut déterminer deux groupes différents :

- les sources de Cormoret et de l'Erguel présentent un chimisme karstique typique, caractérisé par une nette prédominance du calcium et du bicarbonate et une basse teneur en magnésium (< 6 mg/l). Le rapport Mg/Ca est situé entre 0.05 et 0.1;
- l'eau profonde du forage SON1 présente un enrichissement en Mg, avec des teneurs de plus de 20 mg/l et un appauvrissement en Ca. Le rapport magnésium/calcium est élevé (0.6 0.7).

La composition des eaux du forage SON2 se situe entre ces deux extrêmes, avec des teneurs en magnésium de 10 mg/l et un rapport Mg/Ca de 0.24. Ces caractéristiques pourraient résulter d'un mélange d'eaux profondes et superficielles.

L'augmentation des teneurs en magnésium au détriment du calcium a déjà été observée, par exemple dans les forages profonds que nous avons exécutés à Delémont en 1990. Le long temps de séjour des eaux profondes et la présence de dolomie (CaMgCO₃) dans les calcaires de l'aquifère semblent être à l'origine de ce type d'eau.

Sulfates

Les teneurs en sulfates sont basses pour l'ensemble des points mesurés, y compris pour les eaux superficielles provenant de la molasse à St-Imier.

• Chlorures

Les teneurs en chlorures sont surtout dues aux influences d'origine anthropogène. Ceci est illustré par la source molassique et la Suze à St-Imier. Les sources karstiques de Cormoret et de l'Erguel présentent quant à elles de faibles teneurs (< 5 mg/l) à mettre sans doute en relation avec un important effet de dilution.

SON1 et surtout SON2 présentent des concentrations en chlorures supérieures à celles des sources karstiques. Il faut sans doute voir là un reste des acidifications à l'HCl, malgré les 3 semaines de pompage en continu effectués à chaque puits.

Nitrates

Par rapport aux sources karstiques, les forages profonds possèdent des teneurs en nitrates très faibles. Le fait que celles mesurées au SON2 (4.4 et 3.9 mg/l) soient significativement supérieures à celles de SON1 (1 et 1.5 mg/l) pourrait être un indice de mélange avec des eaux d'origine plus superficielle.

Figure 13: analyses chimiques des points d'eau

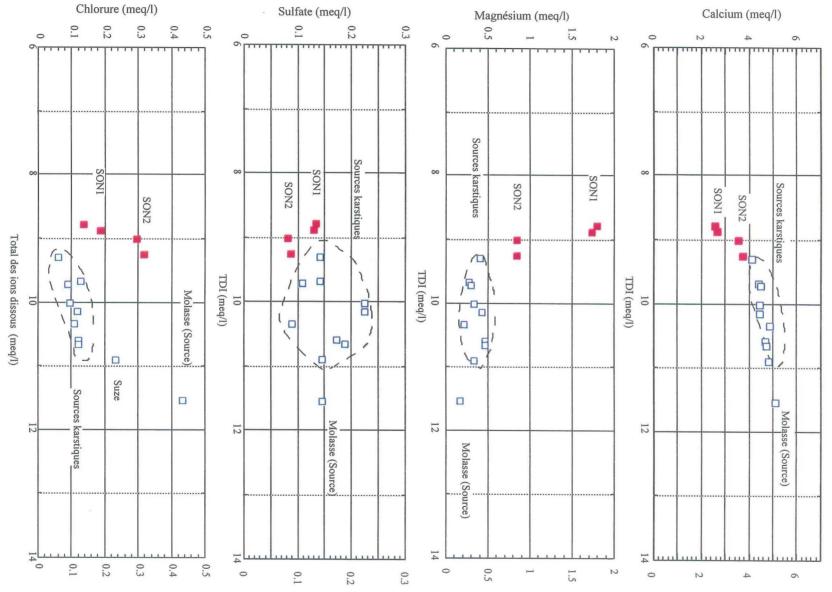
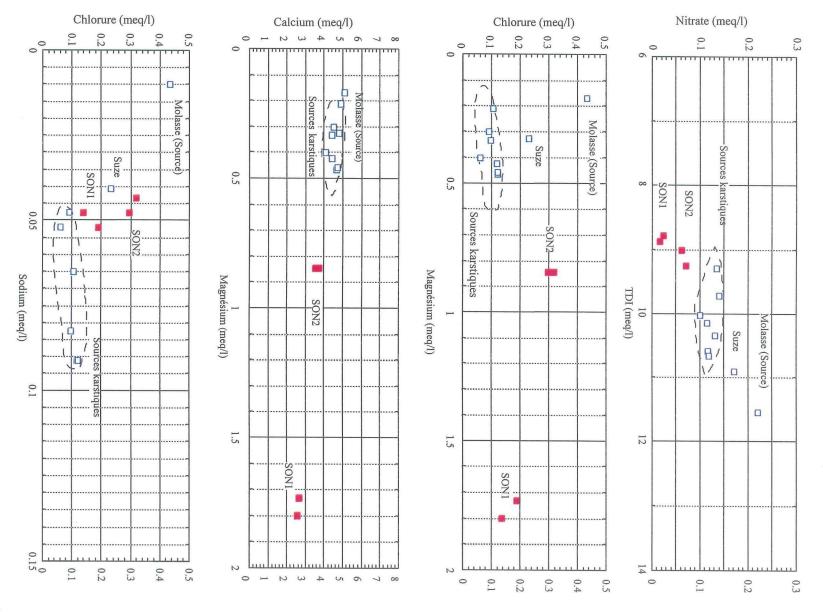


Figure 14: analyses chimiques des points d'eau



• Bactériologie

Seules les eaux des forages ont été analysées. Les deux prélèvements effectués dans SON1 ne contenaient aucun germe d'origine fécale. Par contre, les germes totaux étaient au nombre de 1760 par ml à la première analyse et encore de 720 par ml une semaine plus tard. Leur présence s'explique par l'utilisation de l'eau du ruisseau de l'Erguel durant les opérations de forage. A l'instar des chlorures dus à l'acidification, les centaines de m³ d'eau de forage infiltrés dans l'aquifère pendant les travaux n'ont pas été totalement purgés par les 3 semaines de pompage. La diminution sensible de la quantité de germes d'un prélèvement à l'autre va en tout cas dans le sens de cette explication.

Les analyses du SON2 ont révélé par deux fois la présence d'entérocoques en quantité importante. Pourtant, c'est l'eau du réseau qui a été utilisée pour exécuter ce forage. En l'absence d'Eschérischia coli et en fonction de la diminution du nombre de germes totaux durant les 3 jours de pompage qui séparent les deux analyses, ce résultat est difficilement explicable. Il doit être confirmé par des analyses complémentaires.

Métaux lourds

Les traces de nickel, cuivre, zinc, fer et aluminium décelées dans la première analyse de SON1 n'ont pas été confirmées une semaine plus tard. Elles étaient probablement liées aux tubes de forage ou au dispositif de pompage. Les 10 µg/l de manganèse présents lors de la seconde analyse demandent encore à être confirmés, mais ne constitue pas une surprise dans un aquifère profond. L'analyse de SON2 a mis en évidence des traces de manganèse et d'aluminium, mais à des teneurs inférieures aux objectifs de qualité du manuel suisse des denrées alimentaires (MSDA).

Polyaromatiques, organochlorés et BTEX

Aucune de ces substances d'origine industrielle n'a été décelée par les analyses. Seule la première analyse de SON1 a mis en évidence une faible trace d'anthracène (12 ng/l) qui n'a pas été confirmée par la suite. Il est réjouissant de constater que ces substances, présentes à des concentrations variables dans les sources environnantes, soient totalement absentes des eaux karstiques profondes.

4.3.7 Potabilité de la ressource

D'un point de vue qualitatif, l'eau découverte au forage SON1 est très intéressante. Les teneurs très faibles en nitrates, ammonium et en carbone organique (DOC), l'absence de contamination par des substances d'origine industrielle mettent en évidence d'une part ses qualités pour l'alimentation en eau et, d'autre part, une excellente protection contre les influences anthropogènes. Il faut également souligner la rapidité avec laquelle les eaux se sont éclaircies lors des pompages et l'absence de turbidité durant les trois semaines d'exploitation. Quant au contenu bactérien, l'absence de germes fécaux est réjouissante.

La température de 18.8°C est un peu élevée pour l'alimentation en eau potable. L'idéal serait de la refroidir avant sa consommation, si possible en exploitant cette énergie.

Les analyses de SON2 sont également encourageantes. A l'exception des entérocoques dont la présence demande encore à être confirmée, tous les paramètres remplissent les objectifs de qualité du manuel suisse des denrées alimentaires.

4.3.8 Analyses isotopiques

Les deux forages ont fait l'objet d'un prélèvement d'eau pour l'analyse du tritium et de l'oxygène-18 par l'Université de Berne (Prof. U. Schotterer). Les résultats sont les suivants :

Echantillon	Prélèvement	Tritium [UT]	Oxygène-18 [‰]				
SON 1	29.10.1997	1.9 ± 0.9	-10.50 ± 0.04				
SON 2	07.01.1998	20.4 ± 0.8	- 9.79± 0.04				

U. Schotterer interprète ces résultats de la manière suivante :

• Puits SON1

L'eau du puits montre une concentration très basse en tritium. Cela signifie que la plus grande partie des eaux (85 à 90%) se sont infiltrées dans le sous-sol avant 1952, date des premiers essais thermonucléaires atmosphériques. Ces eaux seraient donc âgées d'au moins 47 ans. L'analyse de l'oxygène-18 indique quant à elle que l'altitude moyenne du bassin-versant des eaux pompées se situerait vers 1100-1200 m. On peut remarquer que cette altitude correspond avec le sommet des chaînes anticlinales bordant le synclinal de St-Imier.

• Puits SON2

L'eau de ce puits est beaucoup plus riche en tritium, ce qui indique un temps de séjour souterrain bien plus court, en moyenne d'environ 10 ans. Une éventuelle origine industrielle (horlogerie) du tritium induirait un âge encore plus jeune. Quant au bassin-versant de ce puits, son altitude moyenne serait inférieure de 300 à 400 m à celle de celui du puits des Sauges. Il est intéressant de noter que, dans la région, cette altitude relativement basse correspond au contact entre les flancs calcaires des anticlinaux bordiers et la molasse du synclinal de St-Imier.

Dans les deux cas, les résultats obtenus sont à confirmer, puisqu'une contamination de l'aquifère par les fluides de forage d'une part et par l'injection d'acide d'autre part était toujours décelable dans les deux puits à l'issue des pompages.

4.3.9 Ressources et perspectives d'exploitation

Les bilans hydrologiques pluriannuels effectués par l'OEHE en 1981 ont montré que la surface du bassin d'alimentation partiel des sources de Cormoret en amont de Sonvilier avoisinait 48 km². Dans ce bassin versant, l'étude avait bien mis en évidence le déficit d'écoulement de la Suze. L'essentiel des précipitations s'infiltre et génère des écoulements souterrains de l'ordre de 1 à 1.5 m³/s en moyenne annuelle.

Ces valeurs situent l'importance de la ressource en eau souterraine dans cette région. Pour comparaison, le débit de 1350 l/min pompé pendant plus de 20 jours au puits des Sauges représente un prélèvement de l'ordre de 2% de l'écoulement total supposé. Compte tenu des conditions de l'essai (étiage, faible rabattement, stabilisation très rapide du niveau, recharge par les pluies), on peut sans aucun doute assurer que le potentiel d'exploitation de l'aquifère profond du Malm est très supérieur au débit mentionné ci-dessus.

A l'aide des valeurs de perméabilité calculées auparavant, il est possible d'estimer le rabattement du niveau d'eau en fonction du débit et de la durée de pompage. Par exemple aux Sauges, l'exploitation en permanence d'un débit de 5000 l/min paraît tout à fait envisageable, puisqu'elle n'engendrerait à long terme qu'un rabattement de l'ordre de 100 m. Toutefois, la condition préalable serait de réaliser un nouveau puits de grand diamètre permettant l'installation d'une pompe de plus grande capacité. Fixer la limite d'exploitation des deux sites n'est actuellement pas possible, car les pompages effectués au cours de cette étude n'ont pas permis de situer le débit critique de chacun des ouvrages. D'autre part, il n'est pas assuré que la qualité de l'eau reste identique en fonction d'une augmentation de la sollicitation de l'aquifère.

On le constate, les besoins en eau potable de la population du haut-vallon, voire d'autres utilisateurs, pourraient être complètement couverts par l'aquifère profond du Malm. La consommation moyenne actuelle dans le canton de Berne est de 350 litres par jour et par personne. En admettant une population de 6500 habitants réparties entre Renan, Sonvilier et St-Imier, les besoins journaliers moyens seraient couverts par le pompage en continu d'un débit de 1600 l/min. A cette quantité, il faut ajouter une marge de sécurité pour couvrir les pointes de consommation. Les dispositifs suivants permettraient de répondre à ces besoins :

- mise en service du puits actuel des Sauges en complément aux captages actuels;
- mise en service synchrone des puits actuels des Sauges et de la Fin du Tilleul, en complément ou en remplacement des captages actuels. Le rendement de ces ouvrages pourrait probablement encore être amélioré par une seconde acidification (surtout SON2);
- exécution et mise en service d'un nouveau puits de grand diamètre, en complément ou en remplacement des captages actuels. Dans ce contexte, il est clairement évident que le site des Sauges est doublement supérieur à celui de la Fin du Tilleul, aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif.

5. MODELE REGIONAL

5.1 GEOLOGIE

Du point de vue stratigraphique, il est intéressant de relever la présence d'une importante couche de molasse tertiaire qui tapisse le fond du synclinal. Ce fait avait déjà été signalé dans le basvallon, vers Corgémont. Sous cette molasse, le Crétacé est bien présent, même s'il est fortement diminué. Il ne subsiste que le Valanginien, les marnes hauteriviennes et la partie basale de la Pierre Jaune. Le forage SON2 a confirmé l'importance de la masse glissée de calcaires secondaires sur la molasse.

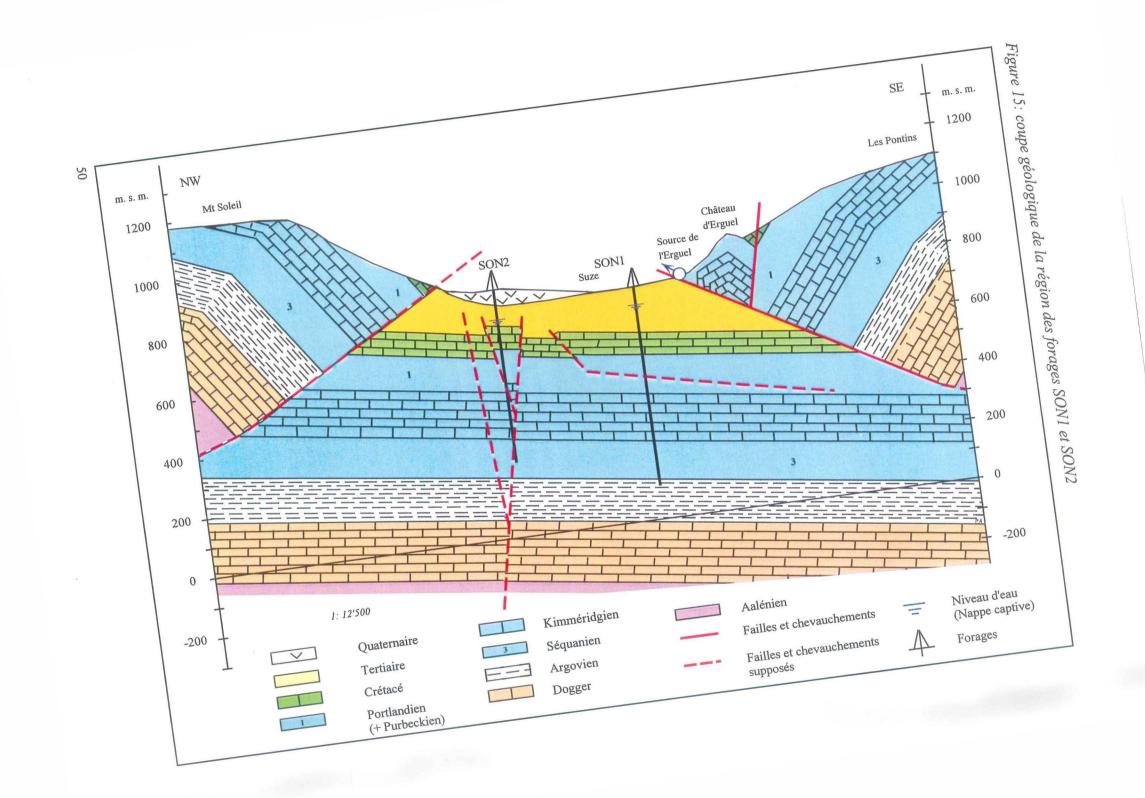
La coupe géologique N - S du synclinal au droit des deux forages est présentée sur la figure 15. Au niveau de la structure du synclinal, les éléments suivants sont dignes d'intérêt :

- au Sud, la sismique a mis clairement en évidence le chevauchement de la molasse par les calcaires du Malm de l'anticlinorium du Chasseral;
- dans la partie centrale, les couches ne forment pas une cuvette synclinal plissée, mais une plaque légèrement mais uniformément basculée vers le Sud avec un pendage de 10 à 15°.

5.2 HYDROGEOLOGIE

La réalisation des deux forages a apporté de nombreuses nouvelles connaissances sur l'aquifère profond du Malm et sur la circulation des eaux souterraines :

- d'importantes ressources en eau d'excellente qualité gisent dans les calcaires du Malm du synclinal. La protection de ces ressources est assurée efficacement par une épaisse couverture tertiaire. En période de précipitations, aucune turbidité n'a été relevée durant les pompages ;
- les calcaires du Kimméridgien assurent la majeure partie des apports d'eau dans les forages. Le Portlandien, qui est le siège des sources de Cormoret, assure une part non négligeable des arrivées dans le forage Nord. Par contre, le Séquanien se signale par une faible karstification;
- il est possible de distinguer dans cet aquifère profond au moins deux systèmes d'écoulement probablement interconnectés :
- le premier, au droit des Sauges, reflète des circulations anciennes, avec des eaux enrichies en magnésium ;
- le second, au droit de la Fin du Tilleul, est sans doute le résultat d'un mélange entre les circulations lentes du fond du synclinal et celles plus rapides de la bordure Nord, dont le caractère s'approche plus franchement de celui des sources karstiques de Cormoret;
- la source de l'Erguel, qui jaillit au contact du chevauchement S du synclinal, est absolument indépendante des systèmes de circulation profonde. Son bassin versant est localisé sur le flanc du synclinal. Le coin de molasse chevauché est sûrement à l'origine de ce cloisonnement entre le flanc et le synclinal.



6. CONCLUSION

La réalisation du projet de recherche d'eau souterraine dans l'aquifère profond du Malm dans le haut-vallon de St-Imier a été couronnée de succès. Les deux puits forés, l'un à 666.6 m et l'autre à 580 m de profondeur, se sont révélés tous deux positifs et ont pu être testés à la capacité maximum de la pompe, soit :

- 1350 litres par minute pour un rabattement de 17 m au puits des Sauges (SON1) ;
- 1100 litres par minute pour un rabattement de 49 m au puits de la Fin du Tilleul (SON2).

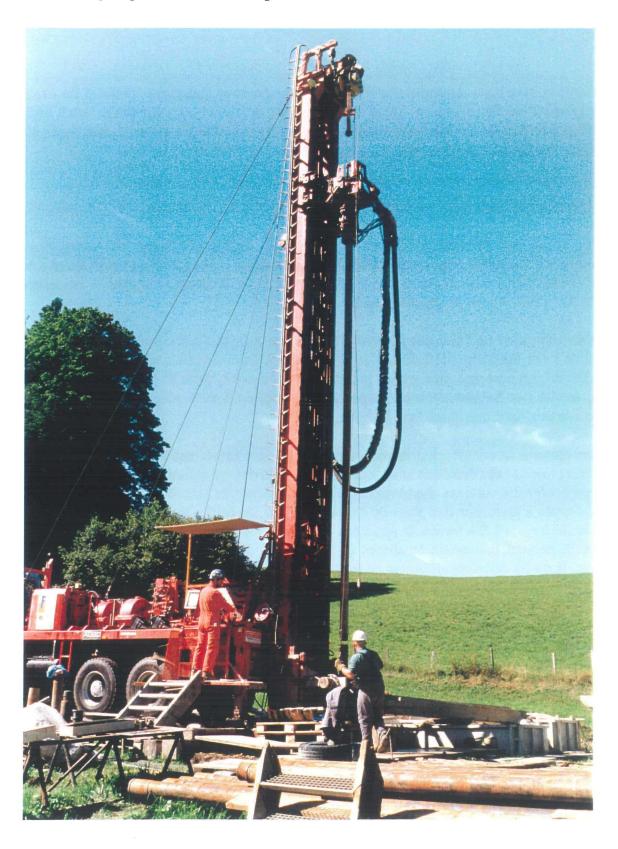
La ressource en eau souterraine du haut-vallon est très importante. Selon nos estimations, l'exploitation d'un débit d'au moins 5000 litres par minute nous paraît possible au site des Sauges. Toutefois, l'aménagement d'un nouveau puits de diamètre plus grand permettant l'installation d'une pompe de grande capacité est nécessaire.

La qualité chimique de l'eau découverte est excellente sur les deux sites testés. Les caractéristiques de l'eau des Sauges reflètent un aquifère profond à circulation lente. Quant au site de la Fin du Tilleul, on note une plus grande proportion d'eau jeune, voire d'eau actuelle. Des deux forages, le site des Sauges présente le potentiel d'exploitation le plus intéressant, tant du point de vue qualitatif que quantitatif.

Ce projet apporte sa contribution dans la connaissance des écoulements karstiques régionaux. Les traceurs injectés ces dernières années dans la région et qui ont abouti aux sources de Cormoret ont probablement suivi un cheminement le long des flancs du synclinal, dans les karsts rapides développés à proximité des plans de chevauchement. On peut aussi supposer que les possibilités de liaisons N - S à travers le synclinal, mises en évidence par plusieurs traçages à partir du flanc S, ne sont finalement localisées qu'au droit du décrochement de la Ferrière et/ou à Cormoret, là où les calcaires affleurent au fond de la vallée.

D'un point de vue plus général, la découverte de cette nouvelle ressource en eau devra induire une réflexion globale sur l'approvisionnement du haut-vallon de St-Imier. Sa gestion nécessitera une bonne connaissance de l'aquifère, de son bassin d'alimentation et surtout la préservation de sa protection. Un suivi à long terme des niveaux piézométriques, de la chimie et de l'âge de l'eau sera aussi le garant d'une exploitation judicieuse de cette ressource.

Travaux de forage sur le site des Sauges



ANNEXE 3: ANALYSES CHIMIQUES, DONNEES BRUTES

		Forage SO	NI	Forage SON2 Source de la		Source du		Source de la		Source de		Source	Suze		
		Les Sauge	uges Fin du Tilleul			Grande Doux		Torrent		Raissette		l'Erguel		St-Imier	St-Imier
		SON1	SON1	SON2		GdD	GdD	TOR	TOR	RAI	RAI	ERG	ERG	33-10	33-30
Température	l °C	20/10/97	27/10/97 18,8	5/1/98	7/1/98	20/10/97	5/1/98	20/10/97	5/1/98	20/10/97 7,8	5/1/98	20/10/97	5/1/98	8/9/97 8,6	8/9/97
Conductivité (25°)	uS/cm	415	406			8,2 503	7,8 464	8,3 504	7,7 455		7,6 400	455	400	594	513
Oxygène dissout	mg/l	413	5,2	443	430	303	404	304	433	407	400	433	400	3,74	313
Saturation	%		58				1						_		
Dureté carbonatée	°f	20,5	20,4	20,8	20,5	24,7	22,4	24.7	21,9	24,3	20,6	22,5	19,5	28,75	25,3
Duretée totale	°f	22	21,8	22,9	(50.000.0010)	25,8	23,5	25,9	23,2	25,5	21.4	24	20,7	27,35	26,4
DOC	mg/l	0,3	0,3	0,6	0,8	0.9	1,2	1	1,1	2,1	1,4	3,4	2	1,3	3,7
Phosphate	mg/l	0,04	0,02		0,03	0,15	0,1	0,14	0,07	0,08	0,01	0,13	0,07		-
Nitrite	mg/l	< 0.002	< 0.002		< 0.002	< 0.002	10.00	< 0.002		0,004		< 0.002		<0.002	0,013
Nitrate	mg/l	1	1,5	4,4	3,9	7,2	8,1	7,3	7,4	8,1	6,3	8,7	8,4	13,7	10,6
Ammonium	mg/l	0,005	0,006	0,004	0,01	0,005	0,012	0,006	0,004	0,008	0,01	0,009	0,006	A	0,119
Chlorure	mg/l	6,7	4,9	11,3	10,5	4,3	4,5	4,3	4,7	3,8	2,7	3,2	2,1	15,4	8,2
Sulfate	mg/l	6,2	6,4	3,5	3,3	8,3	5,7	9	4,6	4,3	3,7	5,2	4,1	20.1	7
Bicarbonate	mg/l	250	249	254	250	301	273	301	267	296	251	275	238		_
Calcium	mg/l	53,4	51,4	74,7	71,3	93,8	88,3	94,5	88,6		83	90,1	78,3		96
Magnésium	mg/l	21,1	21,9	10,3	10,3	5,7	3,4	5,6	2,5	2,6	1,5	3,7	2,7		4
Potassium	mg/l	< 0.5	< 0.5	0,3	0,7	0,6	0,8	1,5	0,4	< 0.5	0,4	1,3	0,6		1,6
Sodium	mg/l	1,2	1,1	1	1,1	2,1	1,8	2,1	2	1,5	1	1,1	0,7	9,2	3,6
Phosphore total	mg/l	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	-,.	-,0		_		_	-	-	-	
Organochlorés		10.02	10102	10102	10102										
1, 1-Dichloroéthylène	ug/l	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5		-	-	-	-	_	-	_	-	
Trans -1, 2-Dichloroéthylène	ug/l	< 5	< 5	< 5	< 5	_		-			_	-	-	-	
Cis-1,2.Dichloroéthylène	ug/l	< 10	< 10	< 10	< 10		-			_			_	-	
Chlorure de méthylène	ug/l	< 5	< 5	< 5	< 5	_	_	-	-	-	-	-	-	-	
Chloroforme	ug/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	_	_	_	_	_	_		_		
1, 1, 1 Trichloréthane	ug/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	_			-		_	-	-		_
Tétrachlorure de carbone	ug/l	< 1	< 1	< 1	< 1	_	_	-	-		_	_	_	-	
Trichloréthylène	ug/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	_	_	_	_	_	_	-	_	_	
Dichlorobromométhane	ug/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	_	_	-	_	_	_	_	_	_	
Dibromochlorométhane	ug/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1		-				_	_		-	_
1, 1, 2 Trichloréthane	ug/l	< 2	< 2	< 2	< 2		_		_		_	-	_	_	_
Perchloréthylène	ug/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	_	_		_				-	_	
Bromoforme	ug/l	< 0.5	< 0.5	< 0.5			_	_	_				-		_
Bactériologie	ug/.	7 0.0	4 0.0	V 0.5	4 0.5										
Eschérichia coli	germes /100 ml	0	0	0	0	_	_	_	_	_	_	_	_		
Entérocoques	germes /100 ml	0	0	10	30	_	_	_	_	_		_	-	_	_
Germes aérobies	germes/ ml	1760	720	360	128	_	_	_	_	-	_	-	-	-	-
Métaux lourds	8														
Nickel	ug/l	2,2	< 0.1	< 0.2	< 0.2	-	-	-	-		-	-	-	-	_
Cuivre	ug/l	1,6	< 0.1	< 0.2	< 0.2	_		-	-	-	-	-	-	-	-
Zinc	ug/l	1,74	< 0.1	< 0.5	< 0.5	_	-	-	-	_	-	-	-	-	_
Plomb	ug/l	< 0.04	< 0.1	< 0.02	< 0.02	_	_	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmium	ug/l	< 0.04	< 0.04	1.000	< 0.02	_	_	-	_	-	-	-	-	-	
Mercure	ug/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	_	_	-	_	-		_	-	-	-
Fer total	ug/l	10	< 10	< 10	< 10	_	_	-	_	-	-	-	-	_	-
Manganèse	ug/l	< 10	10	10	10	-		_	_	_	-	-	-	-	-
Aluminium	ug/l	1,4	< 1	18	29			-	_	_	-	-	-	_	_
Polyaromatiques (PAH)		2,1													
Naphtalène	ng/l	< 10	< 10	< 20	< 10	_		-	12	-		-		-	_
Acénaphtylène	ng/l	< 10	< 10	< 20	< 10	_		_	-	_		_	_		_
Acénaphtène	ng/l	< 10	< 10	< 20		_		_	-			-	-		_
Fluorène	ng/l	< 10	< 10	< 20	20.00							_	_		_
Phénanthrène	ng/l	< 10	< 10	< 20	20.00				_			_	_		_
Anthracène	ng/l	12	< 10	1777				_	_			-			_
Fluoranthène	ng/l	< 10	< 10	< 20									_		_
Pyrène	ng/l	< 10	< 10	< 20											_
Benzo(a)anthracène	ng/l	< 10	< 10	< 20											_
Chrysène	ng/l	< 10	< 10	< 20]	1				
Benzo(b)fluoranthène	ng/l	< 10	< 10	17.01.000				-							
Benzo(k)fluoranthène	ng/l	< 10	< 10	< 20	< 10										
		< 10	< 10	< 20					1						_
Benzo(a)pyrène	ng/l	< 10	< 10												
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	ng/l	< 10	< 10]]	
Dibenzo(a, h)anthracène	ng/l	< 10				-			-						
Benzol(ghi)perylène BTEX (Aromatiques)	ng/l	< 10	< 10	< 20	< 10	-		-	-	-					
	ne n	- 10	- 10	- 10	- 10										
Benzène	ug/l	< 10	< 10	< 10	< 10	-	-	•			Ĵ	.]	1		
Toluène	ug/l	< 10	< 10		< 10	-		-		1		-		10	
Ethylbenzène	ug/l	< 10	< 10		< 10	-	-		-	1	-				
Xylène	ug/l	< 20	< 20	< 20	< 20	-	-	-		-	_	-	-		

ANNEXE 4: BIBLIOGRAPHIE

ARAGNO P.-O (1994): *Etude de la terminaison Ouest de l'anticlinal de Chasseral*. Travail de diplôme, Université de Neuchâtel.

BARSCH D. (1969): Studien zur Geomorphogenese des zentralen berner Jura. - Basler Beiträge zur Geographie, Heft 9, Basel.

BOURQUIN P. (1946): Atlas géologique de la Suisse. Feuilles Biaufond, les Bois, La Ferrière et St-Imier, notice explicative. - Commission géologique de la soc. helv. des sciences naturelles.

BURGER A. (1983): Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. – GWA (Gaz-Eaux-Eaux usées) n° 1037, 1983/9, p. 533 - 583.

CSD (1990): Route cantonale J30, jonction des Convers - Renan, rapport géologique. Direction des travaux publics du canton de Berne.

CSD (1994): St-Imier, les Fourchaux, étude géotechnique. Commune de St-Imier.

DOERFLIGER N., ZWAHLEN F., MEYLAN B., TRIPET J.-P., WILDBERGER A. (1997): Vulnérabilité des captages en milieu karstique – Nouvelle méthode de délimitation des zones de protection – Méthode multicritère EPIK. GWA (Gaz-Eaux-Eaux usées) n° 5/97 p. 295 - 302.

DOERFLIGER N. (1996): Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method). Université de Neuchâtel, thèse de doctorat, 301 p.

EPFZ, département d'hydrologie et de glaciologie (1994): Die massgebenden abflussbildenden Prozesse im Einzugsgebiet der Schüss und ihr Einfluss auf das 100jährliche Hochwasser. Office des ponts et chaussées du canton de Berne.

EPPLER P. (1947): Geologische Beschreibung der Umgebung von Sonceboz im Berner Jura. Université de Berne, publication n° 132 de l'institut de géologie.

FLURY F., WEXSTEEN P. (1989): Recherche en eau par forage en rocher calcaire. Exemple des forages implantés dans la Grande Oolithe (Dogger) à Delémont - Bellerive. Actes 1989 de la Soc. Jurassienne d'Emulation, Porrentruy, p. 35 - 59.

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. – GWA (Gaz-Eaux-Eaux usées) n°12/91, p. 841-849.

FORKERT E. (1933): Geologische Beschreibung des Kartengebietes Tramelan im berner Jura. Eclogae Geologicae Helvetiae, vol. 26, n°1.

GRETILLAT P-A (1986): Etude pour l'établissement d'une décharge cantonale de classe III dans la région des Convers (NE), essai de coloration, été-automne 1985. CHYN, travail de diplôme en hydrogéologie.

JENNY W. (1924): *Geologische Untersuchung im Gebiete des Chasserals*. Leçon inaugurale, Université de Zürich, Buchdruckerei K. J. Wysserben, Berne.

LAUBSCHER H. P. (1981): Thrust and Nappe Tectonics. -The Geological Society of London.

MEURY P., FLURY F. (1988): Recherche d'eau souterraine à Bellerive. Etude hydrogéologique. Services industriels de la ville de Delémont.

MEURY FLEURY RIEBEN SA (1991): Recherche d'eau par forages dans l'aquifère profond du Malm à Delémont. - Résultats de la phase d'exploration. Rapport hydrogéologique. Services industriels de la ville de Delémont.

MONBARON M. (1975): Contribution à l'étude des cluses du Jura septentrional. Thèse de l'Université de Neuchâtel.

MURALT R. (1996): Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien. Thèse de l'Université de Neuchâtel.

OEHE (1974): Essai de coloration Trame - Suze. OEHE du canton de Berne.

OEHE (1981): Données pour la protection et la gestion de l'eau souterraine du canton de Berne - Hydrogéologie du vallon de St-Imier. OEHE du canton de Berne.

OEHE (1990): Données pour la protection et la gestion de l'eau souterraine du canton de Berne - Région de Tramelan, campagne de sondages profonds. OEHE du canton de Berne.

OTT J-C. (1977): Route cantonale T30 Bienne la Chaux-de-Fonds. Suppression du passage à niveau à St-Imier km 8.200, étude géotechnique. Département des ponts et chaussées du canton de Berne.

OTT J-C. (1979): Route cantonale T30 Bienne la Chaux-de-Fonds. Suppression du passage à niveau à St-Imier Km 8.200, variante pont, étude géotechnique. Département des ponts et chaussées du canton de Berne.

SCHINDLER ET GROBET (1980): Etude hydrogéologique de la zone S des captages sis à Cormoret et Villeret. Commission intercommunale pour la protection des sources Courtelary, Cormoret, Villeret, St-Imier, SEF Saignelégier.

SCHINDLER (1982): Zones de protection des captages communaux, sources du Stand, du Righi et de Renan. Commune de Sonvilier.

SCHINDLER (1989): Etude préliminaire d'impact sur les eaux souterraines de la liaision routière J30, jonction les Convers - Renan, comparaison des variantes. Office des ponts et chaussées du canton de Berne.

SCHINDLER (1990): Mouvement de terrain à la rue de la Clef, rapport géologique et géotechnique. Commune de St-Imier.

SCHNEIDER A. (1977): Vallon de St-Imier, Seismische Untersuchung. OEHE du canton de Berne.

SOMMARUGA A. (1997): Géologie du Jura central et du bassin molassique – Nouveaux aspects d'une chaîne d'avant-pays plissée et décollée sur des couches d'évaporites. Mémoire de la société neuchâteloise des sciences naturelles. Tome XII, 176 p.

SUTER H. (1936): Geologische Beschreibung des Kartengebiete Les Bois und St-Imier. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse, 72. Lieferung.

CARTES ET PLANS

Carte hydrogéologique de la Suisse au 1: 100'000, feuille Bienne, 1992.

Carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel au 1: 50'000, Kiraly L., 1973

Carte géologique de la Suisse, 1: 25'000, Suter H. et Bourquin P., feuille 1124 les Bois, 1946.

Carte géologique de la Suisse, 1: 25'000, Bourquin P. et al., feuille 1144 Val de Ruz, 1968.

Carte des zones de protection des eaux, feuilles les 1124 les Bois et 1144 Val de Ruz 1: 25'000, OEHE canton de Berne, 1990.

Carte des zones de protection des eaux, feuille 1125 Chasseral 1: 25'000, OEHE canton de Berne 1990.

