

Le bassin d'alimentation de la source karstique du Brassus (Jura suisse) : synthèse des essais de traçage

Autor(en): **Perrin, J. / Jeannin, P.-Y. / Lavanchy, Y.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **93 (2000)**

Heft 1

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-168810>

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.

Le bassin d'alimentation de la source karstique du Brassus (Jura suisse): synthèse des essais de traçage

J. PERRIN¹, P.-Y. JEANNIN¹ & Y. LAVANCHY²

Mots-clés: Jura plissé, hydrologie karstique, délimitation du bassin d'alimentation, essai de traçage, zones de protection, karst

Key-words: folded Jura, karst hydrology, delimitation of the catchment area, tracer test, protection zone, karst

RESUME

Deux essais de traçage successifs ont été réalisés dans le gouffre de la Pleine Lune situé dans la partie centrale du bassin d'alimentation supposé de la source karstique du Brassus (Jura vaudois, Suisse). Lors des deux essais, le traceur n'a été retrouvé ni à la source du Brassus ni aux autres sources surveillées. Ce résultat inattendu a incité à effectuer une synthèse des données disponibles sur cette source dont voici le compte rendu.

La source du Brassus, située à l'extrémité SW de la Vallée de Joux, constitue un exutoire important de ce secteur du Jura plissé. Elle sourd des calcaires du Crétacé recouverts au niveau de l'émergence d'une pellicule de moraine; toutefois elle est principalement alimentée par l'aquifère sous-jacent des calcaires du Malm, l'aquifère crétacé ne constituant qu'un apport limité.

Sur les 18 essais de traçage recensés dans le bassin d'alimentation supposé de la source du Brassus, seule la moitié des essais ont donné des résultats positifs. Les traçages positifs se caractérisent par des vitesses de transit et des taux de restitution faibles, et ce, particulièrement en période d'étiage. Ces particularités peuvent être attribuées à l'importance du karst noyé, favorisant à la fois la dilution et la dispersion des traceurs.

Le débit moyen de la source est inférieur à 500 l/s, alors que le débit spécifique moyen avoisine 40 l/s/km², si l'on se réfère aux données disponibles pour d'autres sources de la région. Le bassin d'alimentation correspondant à de telles valeurs devrait être égal à 13,5 km²; pourtant une délimitation basée sur la topographie de la base de l'aquifère constitué par les marnes de l'Argovien donne une superficie de 56 km². Cet écart important, de même que les résultats négatifs des deux essais de traçage dans le gouffre de la Pleine Lune, montrent la difficulté d'établir les limites du bassin d'alimentation d'une source karstique: d'une part, une délimitation basée sur un bilan hydrique tend à sous-estimer la taille du bassin; en effet de nombreux exutoires annexes à la source principale (infiltration dans la nappe quaternaire, sources quaternaires sous-alimentées par le karst) sont négligés. D'autre part une délimitation basée uniquement sur des considérations géologiques semble surestimer la surface du bassin, preuve en sont les traçages négatifs.

ABSTRACT

Two successive tracer tests were carried out in the Pleine Lune cave which is located in the central part of the Brassus karstic spring catchment area (South-western Jura, Switzerland). During both experiments, the tracers were not recovered neither at the Brassus spring nor at the secondary springs. Following this amazing result, the available data on this spring have been studied and a synthesis is proposed in this paper.

The Brassus karstic spring, situated in the south-western part of Vallée de Joux, is an important resurgence from this part of the folded Jura. The water emerges from Cretaceous limestones covered by a thin layer of moraine: the main alimentation comes however from the underlying Malm limestone aquifer. Cretaceous limestones bring only a limited part of the total discharge.

Within the supposed Brassus spring catchment area, 18 tracer tests were realised, but only half of them gave positive results. Positive tracer tests show low velocities and poor restitution percentage, particularly during low water periods. Such peculiarities are attributed to an important saturated zone, favouring dilution and dispersion of the tracers.

The average discharge at the spring is assumed to be less than 500 l/s and the average specific discharge is about 40 l/s/km², following previous data on other springs of the area. A calculated catchment area with such values would have a surface of 13,5 km²; but the catchment area derived from the topography of the base of the Malm aquifer (top of the argovian marls considered as an aquitard) covers 56 km². This important difference as well as the negative results obtained from the Pleine Lune cave tracer tests show how difficult it is to define a catchment area for limestone aquifers: on one hand a delimitation based on water balance calculations tends to underestimate the catchment area by neglecting outlets as direct infiltration in the alluviums and secondary springs. On the other hand a delimitation based on geological considerations seems to overestimate the surface; this is illustrated by negative tracer tests results with injection points situated well inside the catchment area.

1. Avant-propos et buts

Suite à la délimitation des zones de protection (Geolep 1991) et à la pollution au purin de la source du Brassus (Parriaux & Mayoraz 1990), de nombreux essais de traçages ont été réalisés dans le bassin d'alimentation présumé de cette source.

Parallèlement, les clubs spéléologiques de Lausanne et de la Vallée de Joux achevaient l'exploration de l'important gouffre de la Pleine Lune également situé dans le bassin de la source (Heiss 1996); en collaboration avec la commission

¹ Centre d'Hydrogéologie de l'Université, rue Emile-Argand 11, 2007 Neuchâtel, Switzerland, e-mail: jerome.perrin@chyn.unine.ch

² ABC, ZI les Ducats, 1350 Orbe, Switzerland

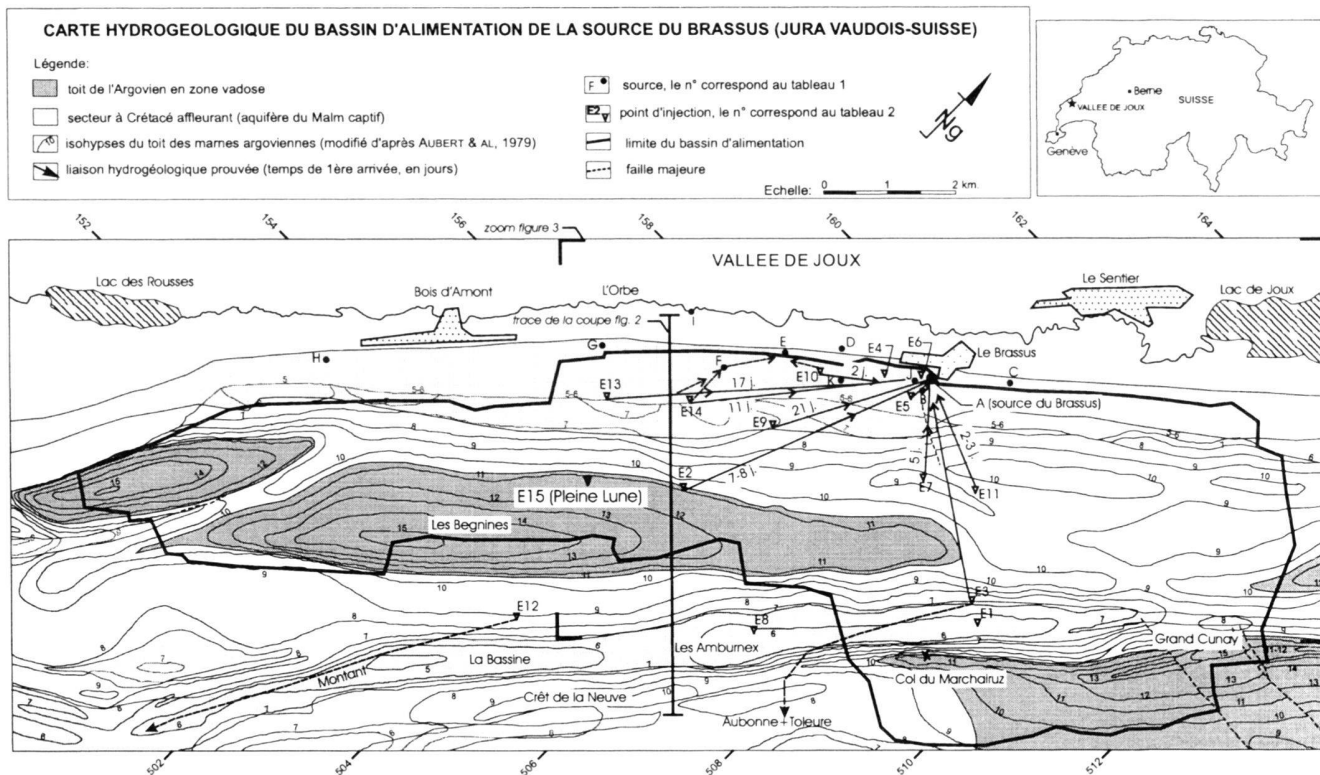


Fig. 1. Bassin d'alimentation de la source du Brassus et isohypses de la base de l'aquifère (marnes de l'Argovien), modifié d'après Aubert et al. (1979). Les limites du bassin sont basées sur la structure géologique, les zones marginales sont englobées dans le bassin dans l'optique d'une protection optimum de la source.

scientifique de la Société Suisse de Spéléologie (SSS) et le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (CHYN), un essai de traçage a été effectué dans le gouffre. Le traceur n'ayant pas été retrouvé, un second essai se déroula l'année suivante confirmant le résultat négatif du premier.

En regard des bonnes conditions d'injection et des résultats des essais voisins, ces résultats sont surprenants, incitant à synthétiser les différentes données disponibles sur la source du Brassus. Cette synthèse permet de proposer une nouvelle délimitation du bassin d'alimentation et de mieux cerner le fonctionnement de cette source karstique.

2. Situation géographique

La source karstique du Brassus, sise au-dessus du village du même nom, se trouve à l'extrémité SW de la partie suisse de la vallée de Joux au coeur du Jura vaudois (Fig. 1). L'autre source importante de ce vaste bassin fermé est la source de la Lionne située dans la terminaison NE de la vallée, à environ dix kilomètres du village du Brassus. La totalité de ces eaux, additionnées des apports de l'Orbe qui prend sa source en France voisine, se déverse dans le lac de Joux et le lac Brenet (au NE du lac de Joux). Les exutoires de ces lacs sont souterrains, ils alimentent l'importante source de l'Orbe située plus au NE.

3. Contexte géologique

Le bassin d'alimentation de la source du Brassus est situé dans le Jura plissé; la géologie régionale a été particulièrement bien étudiée par Aubert (1941) et par Falconnier (1951). La série stratigraphique de la région d'étude est constituée par une alternance de marnes et de calcaires montrant tous les termes intermédiaires.

Le niveau de base des écoulements karstiques est formé par les marnes argoviennes qui ont une puissance approximative de 200 m et présentent une alternance de bancs plus calcaires et plus marneux. Le Malm (Séquanien-Kimméridgien-Portlandien) surmonte les marnes argoviennes et forme l'ossature calcaire de la chaîne. Il est constitué de calcaires massifs entrecoupés de quelques passées marneuses très localisées et sans influence majeure sur les écoulements. Le Malm forme l'aquifère principal du Jura plissé.

Les couches du Crétacé, préservées dans les combes synclinales, présentent une alternance de bancs calcaires et marneux dont l'épaisseur n'excède que rarement dix mètres. De modestes écoulements sur les niveaux marneux se perdent au contact des calcaires; la combe des Amburnex montre de nombreux exemples de ces phénomènes. Cependant, à plus large échelle, ces eaux rejoignent l'aquifère du Malm. Sur l'en-

semble du bassin d'alimentation, la couverture pédologique et quaternaire (silt éoliens et moraine), de basse perméabilité, est peu épaisse; son rôle hydrogéologique est donc très localisé.

Structuralement, le Jura plissé est caractérisé par une succession d'anticlinaux et de synclinaux entrecoupés par des décrochements d'importance variable. Le secteur d'étude montre la succession plicative suivante en partant de la Vallée de Joux: synclinal de la Vallée, anticlinal des Begnines occupé sur son flanc NW par le petit synclinal des Grands-Plats, synclinal des Amburnex et finalement anticlinal du Grand Cunay-Crêt de la Neuve. Les axes de ces plis, d'orientation NE-SW, montrent des plongements axiaux variables soit vers le NE soit vers le SW; aucun décrochement majeur n'est présent dans le bassin versant (Fig. 1 et 2). Une étude de la fracturation a été menée par le Geolep (1991); trois directions préférentielles de fractures subverticales ont été mises en évidence: N50, N100, N160 à N180. Les mesures de fracturation réalisées dans le gouffre de la Pleine Lune et à ses abords immédiats font ressortir des directions préférentielles N35, N55-60, N140 et N175 (Perrin & Jeannin 1996).

4. La source du Brassus et les sources environnantes

La source du Brassus alimente en eau potable la commune du Chenit. Elle jaillit au bas d'un petit vallon d'érosion rempli de matériel morainique masquant tout affleurement rocheux. La carte géologique d'Aubert (1941) apporte trois éléments explicatifs à l'emplacement de la source. D'une part, elle est située au contact des calcaires du Valanginien et des marnes de l'Hauterivien inférieur, indiquant qu'il s'agit d'une source de déversement de l'aquifère du Valanginien; d'autre part, le vallon d'érosion dans lequel sourd l'émergence est situé au droit d'un abaissement axial de l'anticlinal des Begnines (Aubert 1943, Aubert et al. 1979). En dernier lieu, une lecture attentive de la carte montre qu'une faille (N110°) est vraisemblablement associée à cet abaissement axial et traverse les formations du Malm et du Crétacé. Cet accident permettrait ainsi à l'eau de l'aquifère du Malm de remonter vers la source du Brassus sise en terrain Crétacé.

Cette source constitue l'exutoire principal de l'aquifère du Malm comme l'atteste sa conductivité électrique inférieure aux sources issues du Crétacé. Elle ne possède pas de stations de jaugeage de débits; cependant les observations épisodiques montrent qu'il s'agit d'une source typiquement karstique avec des crues très brutales et des écarts de débits significatifs. Les crues ne débutent que quelques heures après d'importants orages (4 heures d'après Aubert 1943). Le débit maximum doit dépasser les 5000 l/s alors que le débit d'étiage doit avoisiner 100 l/s; on peut estimer le débit moyen entre 200 et 500 l/s.

La cartographie de la région et la construction de coupes géologiques (Aubert 1941) ont permis d'extrapoler la topographie de la base de l'aquifère du Malm représenté par le toit des marnes de l'Argovien (Aubert et al. 1979). A partir de cette information, le bassin d'alimentation supposé de la source a été

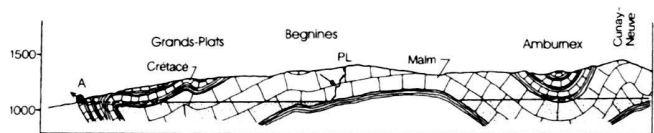


Fig. 2. Coupe géologique schématique entre l'Orbe et l'anticlinal de la Neuve. A = source du Brassus (projetée), PL = gouffre de la Pleine Lune (la flèche indique le point d'injection). La ligne horizontale représente le niveau minimal de la zone noyée dans l'aquifère du Malm.

défini (Fig. 1). Il faut ajouter que les zones marginales ont été englobées dans les limites du bassin et ce, pour des raisons de protection des eaux de la source.

De nombreuses sources jaillissent dans la partie amont de la Vallée de Joux. Plusieurs sont alimentées par de petits aquifères situés dans les terrains meubles quaternaires (conductivité significativement plus élevée), d'autres sont susceptibles d'être partiellement sous-alimentées par l'aquifère du Malm. Une majorité de ces dernières furent surveillées lors des essais de traçage au gouffre de la Pleine-Lune; elles sont reportées dans le tableau 1.

Les deux plus importantes sont la source du Biblanc et la source des Vandelle: la source du Biblanc se compose en fait de trois émergences situées dans le flanc d'un vallon creusé par un ruisseau de surface coulant encore à certaines périodes de l'année. Ces émergences présentent des conductivités électriques quelque peu différentes les unes des autres. Deux sont situées à même altitude et sourdent de fissures dans l'unité calcaire et marno-calcaire du Valanginien inférieur; la troisième sort des calcaires du Valanginien supérieur quelque 50 mètres plus haut; elle est surmontée par une petite grotte faisant office de trop-plein lors de grosses crues. En étiage toute ces sources tarissent, alors qu'en temps normal le débit total doit avoisiner 10 l/s. En crue le débit monte à plusieurs dizaines de litres/seconde et des phénomènes intéressants se produisent dans la grotte du Biblanc s'ouvrant à proximité des sources inférieures: en crue moyenne, un ruisseau sort d'une galerie dans les parties inférieures de la grotte et se perd quelques mètres en aval dans un passage noyé. En grosse crue, le débit ne peut plus être absorbé en totalité et la grotte se noie en partie; le surplus d'eau sort par une fissure située quelques mètres sous l'entrée de la grotte et rejoint le torrent du Biblanc.

La source des Vandelle présente en temps normal deux émergences de même conductivité électrique sortant de l'éboulis recouvrant les calcaires du Valanginien inférieur. Le débit est alors estimé à 15 l/s. En crue, l'eau provient aussi directement de fissures dans les calcaires, le débit doit alors avoisiner les 1000 l/s.

5. Les essais de traçage

Quelque 18 essais de traçage ont été recensés dans le bassin d'alimentation supposé de la source du Brassus (tableaux 2 et

N° de la source	Nom de la source	Coordonnées	Altitude	Débit moy [l/s]	Conductivité 20°C [μ S/cm]	Température [°C]	Aquifère supposé
A	Brassus	506.175/159.250	1055 m.	500	295-360	5.0-6.5	Glaciaire jurassien
B	Ruisseau du Rocher	506.175/159.225	1055 m.	?	300-450	0.0-13.0	Glaciaire jurassien
C	Tremplin	506.450/160.010	1030 m.	2	442*	7.9*	Glaciaire jurassien
D	Chez Lecoultré	504.775/158.940	1040 m.	5	467*	7.8*	Glaciaire jurassien
E	Bursine	504.070/158.090	1040 m.	10	420*	6.6*	Glaciaire jurassien
F	Biblanç	503.800/157.260	1120 m.	10	378*	6.9*	Crétacé
G	Carroz	502.240/156.350	1090 m.	5	396*	5.9*	Crétacé (Urgonien)
H	Vandelles	499.400/153.070	1140 m.	15	384*	6.1*	Crétacé
I	Orbe à Pré Rodet	502.750/157.500	1037 m.	2000	343*	8.6*	
J	Drain Lande-Dessous	506.038/159.200	1085 m.	?	?	?	Glaciaire jurassien
K	Grand-Molard	505.200/158.425	1195 m.	?	?	?	Glaciaire-Valanginien inf.

*=une seule mesure

Tab. 1. Liste des sources surveillées lors des essais de traçage dans le gouffre de la Pleine Lune.

No de l'essai	Lieu d'injection	Géologie pt d'injection	Date injection	Traceur	Conditions d'injection locales	Sources surv.	Type, durée de surv.
1a	Pré de Bière 509 100 / 157 270 / 1350 m	Crétacé	05.11.1897	Uranine 8 litres (?)	doline-perte débit 2 l/s	A	visuel
1b	Pré de Bière 509 100 / 157 270 / 1350 m	Crétacé	29.05.1888	Uranine 8 kg	doline-perte débit 2 l/s	A	visuel
2	Gouffre de la Cascade 504 430 / 155 420 / 1335 m	Malm	05-07-70 12.00	Uranine 12 kg	ruisseau -40 dans gouffre	A, D, E, F, G, I	visuel FC
3	Fontaine Froide 508 800 / 157 400 / 1330 m	Crétacé	?	Uranine ? ?	?	?	?
4	Molards 505 500 / 159 000 / 1125 m	Moraine sur Crétacé	13-11-80	Uranine 1 kg + 5 kg NaOH	sondage, avec 7 m ³ d'eau	A	FC 27 j.
5a	Lande Dessous 506 070 / 159 025 / 1130 m	Moraine sur Crétacé	20-06-88 15.50	Naphtionate 5 kg	Fouille, avec 0.5 m ³ d'eau	A	E + FC 120 j.
6	Sur la source 506 050 / 159 250 / 1080 m	Moraine sur Crétacé	20-06-88 10.00	NaCl 330 kg	Fouille, avec 0.7 m ³ d'eau	A	E + FC 120 j.
7	Meylande Dessus W 506 950 / 158 200 / 1315 m	Malm	20-06-88 13.40	Uranine 2 kg	Fouille, avec 0.5 m ³ d'eau	A	E + FC 120 j.
8	Amburnex 506 740 / 154 820 / 1290 m	Crétacé	21-06-88 9.30	Eosine 10 kg	Doline avec 20 m ³ d'eau	A	E + FC 120 j.
9a	Cerney 504 800 / 157 200 / 1283 m	Crétacé	07-07-89	punn	vidange de fosse		
9b	Cerney 504 800 / 157 200 / 1283 m	Crétacé	29-06-90 10.30	Uranine + Duasyné 3 kg + 3 kg	Fouille, avec 20 m ³ d'eau	A	E + FC
5b	Lande-Dessous 506 070 / 159 025 / 1130 m	Moraine sur Crétacé	27-07-92 13.30	Naphtionate 5 kg	Epanchage avec 24 m ³ d'eau	A, B, D, J, K	E + FC 125 j.
10	Grand-Molard 504 950 / 158 275 / 1210 m	Crétacé	27-07-92 7.30	Sulforhodamine 4 kg	Epanchage avec 20 m ³ d'eau	A, B, D, J, K	E + FC 125 j.
11	Meylande Dessus E 507 600 / 158 538 / 1330 m	Malm	27-07-92 10.00	Uranine 5.5 kg	Epanchage avec 16 m ³ d'eau	A, B, D, J, K	E + FC 125 j.
12	La Bassine 504 075 / 152 225 / 1300 m	Malm	28-07-92 8.00	Eosine 10 kg	Epanchage avec 16 m ³ d'eau	A, B, D, J, K	E + FC 125 j.
13	Grands Plats de Vent 502 800 / 155 675 / 1280 m	Crétacé	21-07-94 16.00	Eosine 10 kg	Fouille, avec 10 m ³ d'eau	A, F	E + FC 67 j.
14	Grands Plats de Blae 503 675 / 156 425 / 1273 m	Crétacé	21-07-94 10.30	Uranine 5 kg	Fouille, avec 20 m ³ d'eau	A, F	E + FC 67 j.
15a	Gouffre Pleine Lune 503 375 / 154 520 / 1300 m	Malm	18-11-94 22.45	Duasyné 5 kg	Ruisseau 2 l/s gouffre -120 m	A, C, D, E, F, G, H, I	E + FC 36 j.
15b	Gouffre Pleine Lune 503 375 / 154 520 / 1300 m	Malm	23-05-95	Uranine 3 kg	Ruisseau 2 l/s gouffre -120 m	A, E, F, I	E + FC 51 j.

Tab. 2. Liste des points d'injection des essais de traçage effectués dans le bassin d'alimentation de la source du Brassus.

3). Les données disponibles restent fragmentaires pour les essais les plus anciens (essais 1 à 4); les moyens analytiques rudimentaires de l'époque doivent inciter à la prudence lors de l'interprétation des résultats.

Les essais 5 à 14 ont été entrepris d'une part dans le cadre de la délimitation des zones de protection de la source (Geolep 1991), d'autre part suite à la pollution au purin de la source à partir du 07.07.1989 («essai» 9a).

Les deux derniers essais ont été réalisés par «curiosité scientifique» lors de l'achèvement de l'exploration du gouffre de la Pleine Lune; cette cavité développe 1700 mètres de conduits pour une profondeur de 271 mètres; elle traverse en grande partie la zone vadose de l'aquifère du Malm (Heiss 1996, Christen et al. 1995, Fig. 2). Le déroulement de ces deux essais étant inédit, ils sont rapidement décrits dans le paragraphe qui suit.

Essais dans le gouffre de la Pleine Lune

Le premier essai s'est déroulé le 18 novembre 1994, le gouffre était en crue moyenne suite à des pluies tombées sur la région: la station météorologique de La Cure située à l'extrémité SW de la Vallée de Joux a enregistré 59 mm de pluie entre le 9 et le 15 novembre et 32 mm le 18. Similairement, la station du Sentier a mesuré 41 mm entre le 9 et le 15 et 22 mm le 18. Le traceur utilisé fut la duasyné fluorescente jaune T liquide décrite par Allemann & Mdaghri Alaoui (1991). Cinq kilos furent déversés dans un ruisseau de 2 l/s à 120 mètres de profondeur dans le gouffre (Fig. 2). Les sources surveillées sont reportées dans le tableau 1: des fluocapteurs furent installés à toutes les sources, la source du Brassus fut équipée d'un échantillonneur automatique alors qu'un échantillonnage journalier était effectué aux autres sources pendant un mois. Un dernier prélèvement s'est déroulé cinq semaines après l'injec-

No de l'essai	Lieu d'injection	Délect. Brassus	Détection autres sources	Distance Brassus	Temps 1ère arrivée	V max. Brassus	Resti-tution	Auteur
1a	Pré de Bière 509 100 / 157 270 / 1350 m	-	-	3500 m				Aubert S. & Forel F.-A.
1b	Pré de Bière 509 100 / 157 270 / 1350 m	-	-	3500 m				Aubert S. & Forel F.-A.
2	Gouffre de la Cascade 504 430 / 155 420 / 1335 m	+	-	4100 m	7-8 j.	21 m/h		Baudet J. & S.S.A.
3	Fontaine Froide 508 800 / 157 400 / 1330 m	+	Aubonne Toleure	3300 m	?	?		Aubert D.
4	Molards 505 500 / 159 000 / 1125 m	-	-	600 m	> 27 j.	< 0.9 m/h		Mautner J. Labo. cant.
5a	Lande Dessous 506 070 / 159 025 / 1130 m	+	-	280 m	8 j. (frein moraine)	1,5 m/h	8%	GEOLEP
6	Sur la source 506 050 / 159 250 / 1080 m	-	-	75 m	> 120 j.	< 0.03 m/h		GEOLEP
7	Meylande Dessus W 506 950 / 158 200 / 1315 m	+	-	1420 m	5,2 j.	11 m/h	< 1%	GEOLEP
8	Amburnex 506 740 / 154 820 / 1290 m	-	-	4500 m	> 120 j.	< 1.6 m/h		GEOLEP
9a	Cerney 504 800 / 157 200 / 1283 m	+	-	2500 m	> 7 j.	< 15 m/h		
9b	Cerney 504 800 / 157 200 / 1283 m	+	-	2500 m	21 j.	5 m/h	8%	CSD
5b	Lande-Dessous 506 070 / 159 025 / 1130 m	-	-	300 m	> 125 j.	< 0.1 m/h		Y. Lavanchy G. E. & S.
10	Grand-Molard 504 950 / 158 275 / 1210 m	+	E 04-12-94	1500 m	57 h. (arrivée avec crue)	26 m/h	7%	Y. Lavanchy G. E. & S.
11	Meylande Dessus E 507 600 / 158 538 / 1330 m	+	-	1750 m	55 h. (arrivée avec crue)	32 m/h	48%	Y. Lavanchy G. E. & S.
12	La Bassine 504 075 / 152 225 / 1300 m	-	Montant	7300 m	> 125 j.	< 2.4 m/h		Y. Lavanchy G. E. & S.
13	Grands Plats de Vent 502 800 / 155 675 / 1280 m	+	F, E	4900 m	17 j.	12 m/h	16%	Y. Lavanchy AB conseil
14	Grands Plats de Blise 503 675 / 156 425 / 1273 m	+	F, E	3800 m	17 j. (arrivée avec crue)	9 m/h	10%	Y. Lavanchy AB conseil
15a	Gouffre Pleine Lune 503 375 / 154 520 / 1300 m	-	-	5800 m	> 36 j.	< 6.7 m/h		GSL, SCVJ, CHYN
15b	Gouffre Pleine Lune 503 375 / 154 520 / 1300 m	-	-	5800 m	> 51 j.	< 4.7 m/h		GSL, SCVJ, CHYN

Tab. 3. Résultats des essais de traçage listés dans le Tab. 2.

tion. En plus des sources mentionnées, les sources importantes du pied du Jura (Montant, Toleure, Aubonne) furent échantillonnées cinq semaines après l'injection. Aucune trace de diuysne ne fut retrouvée.

Le deuxième essai fut effectué le 23 avril 1995, le gouffre était en crue suite à la fonte des neiges. Trois kilos d'uranine furent injectés dans le même ruisseau que lors de l'essai précédent, le débit avoisinant aussi 2 l/s. Des fluocapteurs furent installés à toutes les sources mentionnées dans le tableau 1. Seule la source du Brassus fut échantillonnée à l'aide d'un échantillonneur automatique. La surveillance a duré sept semaines, aucune trace d'uranine ne fut retrouvée.

Les paragraphes suivants présentent successivement les résultats des essais de traçage positifs à la source du Brassus et aux autres sources puis les essais de traçages négatifs en se référant aux tableaux 2 et 3 ainsi qu'à la figure 1.

Essais positifs à la source du Brassus

Sur les 18 recensés, 9 essais de traçage ont montré une liaison indubitable avec la source (tableau 3).

Vitesses de transit

De façon générale, les vitesses de transit des traceurs sont faibles pour un système karstique, puisqu'elles s'échelonnent entre 1,5 m/h et 32 m/h. Ces écoulements lents sont probable-

ment liés à l'importance de la zone noyée de l'aquifère tel que montré à la figure 1.

La variabilité de ces vitesses est liée à plusieurs facteurs:

- 1) *La formation géologique du site d'injection* (Malm, Crétacé, Quaternaire) ainsi que les modalités d'injection (épandage, perte, doline) peuvent retarder significativement l'arrivée du traceur à la source; ainsi, l'essai positif de la Lande-dessous montre la vitesse la plus faible (1,5 m/h) probablement parce que l'injection a été faite dans une fouille creusée dans une moraine peu perméable; certains essais ont été effectués par épandage d'eau colorée pour simuler une pollution au purin (essais 10 et 11), il est clair qu'une telle injection dispersée ralentit l'infiltration et de fait le transit.
- 2) Les conditions hydrodynamiques jouent un rôle important sur la vitesse d'écoulement: les essais effectués en conditions d'étiage montrent les vitesses les plus lentes (essais 5a, 7, 9b, 13 et 14). De plus, pour les essais 9b, 10, 11, 13 et 14, il a été constaté que le traceur est réapparu à la faveur d'une crue importante à la source faisant suite à une période sèche (CSD 1990, Geolep 1991). Le seul essai positif réalisé en condition de crue dès l'injection est celui qui s'est déroulé au gouffre de la Cascade (essai 2); en effet, la présence d'un ruisseau à -40 mètres dans le gouffre n'est effective qu'en hautes eaux (Baudet 1974).

- 3) Le dernier facteur influençant la vitesse de transfert est la *répartition des perméabilités au sein de l'aquifère*; dans la région, les données restent trop fragmentaires pour pouvoir associer des vitesses élevées à des directions bien déterminées d'écoulement préférentiel. Toutefois plusieurs cavités karstiques présentent des ruisseaux souterrains démontrant l'existence de drains très perméables dans la zone non saturée de l'aquifère.

Taux de restitution

Les taux de restitution calculés sont en moyenne de 10%. Ils ne donnent toutefois que des ordres de grandeur puisque les débits sont généralement mal connus ($\pm 50\%$). Ces valeurs sont faibles et peuvent s'expliquer par l'importance de la zone noyée de l'aquifère. Il est probable que des exutoires secondaires évacuent une partie du traceur, diminuant d'autant le taux de restitution. Il semble que les restitutions soient plus importantes en période de crue: ainsi l'essai 7, effectué en basses eaux (vitesse moyenne de 11 m/h), montre un taux de restitution inférieur à 1% (concentration maximale du traceur = 0.152 ppb) alors que l'essai 11 (vitesse moyenne de 32 m/h) connaît une période pluvieuse après l'injection et atteint 48% de restitution (concentration maximale du traceur = 200 ppb).

Caractéristiques de l'aquifère

L'essai 3 effectué à Fontaine Froide a montré à la fois une relation avec la source du Brassus et les sources du Toleure et de l'Aubonne au pied du Jura (Aubert et al. 1979). C'est la seule évidence de la participation du synclinal des Amburnex à l'alimentation de la source du Brassus. Cependant ce résultat est à considérer avec circonspection, aucun rapport n'ayant été publié. Les trois autres traçages (essais 1, 8 et 12) réalisés dans ce synclinal n'ont pas montré de lien avec la source.

Les essais 2, 7 et 11 dont les points d'injection sont situés dans le Malm démontrent de manière claire la participation de l'aquifère du Malm à l'alimentation de la source du Brassus. Les autres essais positifs (5, 9, 10, 13 et 14) ont des points d'injection dans les calcaires crétacés: l'eau traverse la série du Crétacé pour rejoindre l'aquifère du Malm puis remonte dans le Crétacé pour jaillir à la source.

Essais positifs aux autres sources

L'injection à la Bassine (essai 12) a montré une relation avec l'importante source du Montant à Genolier (Pied du Jura), les eaux ont suivi vraisemblablement la gouttière synclinale des Amburnex.

Les essais 13 et 14, réalisés en parallèle dans le synclinal crétacé des Grands Plats, ont établi un lien intéressant avec la source du Biblanc (source F). En effet, environ un mois après leur réapparition à la source du Brassus, les deux traceurs ont été détectés à la source du Biblanc à la suite de fortes précipitations (débit supérieur à 3 m³/s au Brassus). En conditions hydrodynamiques normales, les eaux du synclinal des Grands

Plats se dirigent donc vers la source du Brassus; en hautes eaux, elles gagnent également la source du Biblanc qui peut être considérée comme le trop-plein de la source du Brassus (la dénivellation entre ces deux sources est de 65 mètres). Une sous-alimentation (drainance) de la source du Biblanc par l'aquifère du Malm ne peut pas non plus être exclue (analogue à la source du Brassus).

Trois mois après l'injection, les deux traceurs ont encore été détectés à la source de la Bursine (source E). Cette source se trouve à environ un kilomètre de la source du Biblanc et 80 mètres plus bas; elle jaillit en paysage morainique en précipitant d'importantes quantités de tuf. Ce résultat indique que l'aquifère des calcaires crétacés se déverse au moins partiellement dans les moraines qui alimentent la source de la Bursine.

Une évidence pour une telle alimentation pourrait être le ruisseau souterrain se perdant dans la grotte du Biblanc. Il est possible qu'il résurge à la source de la Bursine, un essai de traçage permettrait d'en apporter confirmation.

L'essai 10 réalisé au Grand Molard (en terrain Crétacé) avait montré une relation avec la source du Brassus (taux de restitution de 7%); plus de deux ans après, des traces de sulforhodamine étaient présentes à la source de la Bursine. Cette diffluence illustre à nouveau la relation existant entre l'aquifère du Crétacé et la source de la Bursine.

Essais négatifs

Les deux essais effectués à la fin du siècle passé au Pré de Bière, dans le synclinal des Amburnex, se sont avérés négatifs (Forel & Aubert 1898); il faut rester prudent dans l'interprétation de ces essais puisque la surveillance aux sources était uniquement visuelle. Dans ce même synclinal, l'essai 8, au cours duquel les sources surveillées englobaient le Montant et la Lionne, est resté négatif à la source du Brassus. Seul l'essai 3 discuté plus haut a montré une participation du synclinal des Amburnex à l'alimentation de la source du Brassus. Toutefois les données disponibles sur cet essai sont extrêmement fragmentaires (absence de rapport ou de publication) et empêchent d'aller plus loin dans l'interprétation. De fait, il est vraisemblable que les eaux du synclinal des Amburnex restent cantonnées au synclinal et s'écoulent lentement vers les sources du pied du Jura (Aubonne, Toleure, Montant). Toutefois, faute d'évidences claires, une partie du synclinal des Amburnex est englobé dans le bassin d'alimentation de la source du Brassus (Fig. 1) et ce, par mesure de sécurité en vue de la préservation de la qualité des eaux de la source.

L'injection au Molard (essai 4) est restée négative (Laboratoire Cantonal 1980) alors que l'essai 10 réalisé à proximité avait montré une relation avec la source du Brassus. Plusieurs explications peuvent être envisagées pour ce résultat négatif: d'une part la surveillance s'est faite au moyen de fluocapteurs (seulement 1kg d'uranine injectée) et n'a duré que 27 jours; d'autre part l'essai s'est déroulé en étiage prononcé (mois de novembre froid) et en dernier lieu le point d'injection était un sondage dans une formation morainique argileuse très peu

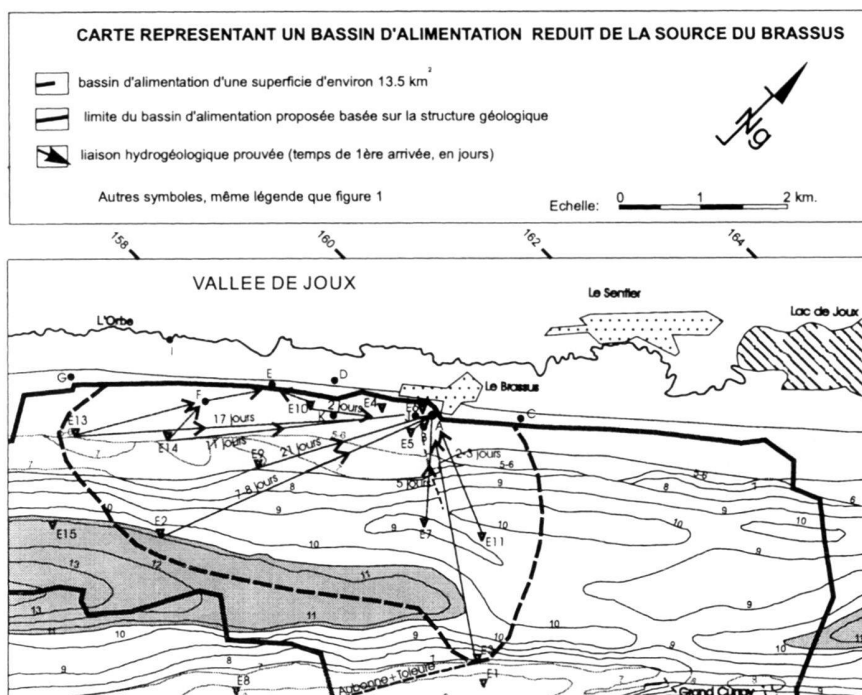


Fig. 3. Représentation du bassin d'alimentation correspondant au débit annuel moyen de la source et englobant tous les essais de traçage positifs.

perméable (un mois après l'injection, des restes d'eau colorée subsistaient...). Ainsi, il est probable que cette zone participe malgré tout à l'alimentation de la source du Brassus et cela se confirme par le résultat de l'essai 10 au Grand-Molard.

L'essai 5b à la Lande-Dessous est resté négatif probablement à cause du mode d'injection qui consistait en un épandage du colorant. En effet, l'essai 5a réalisé au même endroit mais par injection ponctuelle a montré une relation indubitable avec la source.

L'injection de l'essai 6 a été effectuée en terrain morainique 75 mètres au-dessus de la source du Brassus (330 kg de NaCl). Trente-six jours après l'injection, les concentrations en Cl^- et Na^+ ont augmenté parallèlement à celles en NO_3^- ; ces augmentations ont été attribuées aux urines du bétail qui commençait la saison d'estivage. Le résultat de cet essai reste donc douteux, mais montre que la couverture morainique freine considérablement les infiltrations dans ce secteur. Il est probable que le résultat eut été plus convaincant si l'essai avait été réalisé en hautes eaux et avec des quantités plus importantes de NaCl ou avec un autre traceur.

Les résultats négatifs les plus étonnants ont été obtenus lors des deux injections successives au gouffre de la Pleine Lune. Ce gouffre s'ouvre à 1 km du gouffre de la Cascade où un essai de traçage positif a été réalisé (essai 2) dans des conditions hydrodynamiques et géologiques similaires. Par cette proximité, le gouffre de la Pleine Lune se situe au milieu du bassin d'alimentation de la source du Brassus. Il s'agit donc d'esquisser quelques explications pour ces deux essais négatifs pour le moins surprenants :

- a) Les échantillons analysés en fluorimétrie directe montrent tous des concentrations en uranine ou en duasyne au-dessous des limites de détection et les fluocapteurs laissés à la source sont restés négatifs. Cependant il peut être envisagé que les traceurs sont arrivés à la source du Brassus, mais en concentrations trop faibles pour être détectés en fluorimétrie: l'essai 7, montrant une concentration maximale en uranine de 0,152 ppb par HPLC (limite de détection à 0,01 ppb), est considéré comme positif alors qu'un dosage par fluorimétrie aurait donné un résultat douteux, le seuil représentatif de cette méthode étant d'environ 0,3 ppb (Besson 1993). Il est aussi possible que la durée de surveillance à la source ait été trop brève: ce serait le cas pour des vitesses des traceurs inférieures à 5 m/h. Des essais positifs montrant de telles vitesses sont illustrés par les essais 5a et 9b. Toutefois ces contre exemples ont été obtenus en période d'étiage contrairement aux essais dans le gouffre de la Pleine Lune réalisés en hautes eaux lorsque les vitesses sont nettement plus élevées.
- b) Les traceurs n'ont pas atteint la source du Brassus car le point d'injection est situé, soit hors du bassin d'alimentation de la source du Brassus, soit en bordure de ce bassin. Dans le second cas, un phénomène de diffluence est envisageable, la dilution et la dispersion restant dans tous les cas importantes. Si l'on se réfère à la carte du toit de l'Argovien, on remarque que vers le SW (entre le Mont Pelé et le Creux du Croue), la zone noyée située au NW de l'anticlinal des Begnines dépasse la cote d'un ensellement de l'axe de cet anticlinal (Fig. 1); il existe donc une possibilité

de diffuence des eaux en direction du SSW vers les sources du pied du Jura. Un échantillonnage de ces sources effectué environ un mois après la première injection n'a cependant pas permis de retrouver de traces de colorant.

6. Discussion et conclusion

L'altitude moyenne du bassin d'alimentation de la source du Brassus est comprise entre 1200 et 1300 m: les précipitations annuelles moyennes correspondantes sont de 1600 mm selon le travail de Petch (1970) et les données des stations pluviométriques des environs (Le Sentier, La Cure, La Dôle). L'évapotranspiration annuelle moyenne est estimée à 450 mm à telle altitude par Jeanblanc & Schneider (1981), réduisant la lame d'eau infiltrée à 1150 mm. Ces valeurs donnent un débit spécifique moyen de 36 l/s/km² similaire au 37 l/s/km² calculé par Tripet (1973) pour le bassin d'alimentation de la source de l'Areuse dans le Jura neuchâtelois.

En estimant le débit annuel moyen maximum de la source du Brassus à 500 l/s, on trouve une superficie du bassin d'alimentation égale à 13,5 km² (Fig. 3). Cette surface est quatre fois inférieure à celle déterminée à partir de la structure géologique de l'aquifère (Fig. 1). Une telle inadéquation montre la difficulté d'établir le dimensionnement du bassin d'alimentation d'un tel système karstique: il est fort probable que la taille du bassin dépende des conditions hydrauliques. En période de crue, la mise en charge de la nappe provoque un débordement d'une partie des eaux vers d'autres exutoires, réduisant d'autant la superficie du bassin. En période d'étiage, il est vraisemblable que la zone d'infiltration s'élargisse, bien que le phénomène de diffuence puisse être encore présent.

Un tel fonctionnement de l'aquifère est rendu possible par sa structure géologique particulière: la succession d'anticlinaux et de synclinaux à axes de plis peu inclinés dans l'une ou l'autre direction autorise l'existence d'une zone noyée importante en connexion avec plusieurs exutoires.

Les faibles vitesses et les bas taux de restitution des traceurs illustrent la taille du karst noyé. Plusieurs essais de traçage effectués dans la zone d'alimentation de la source ne sont pas réapparus, ils se sont probablement dilués et dispersés totalement dans la zone noyée. Cependant, la totalité des essais positifs peuvent être englobés dans le bassin d'alimentation calculé à partir du débit spécifique moyen de la source (Fig. 3). Une telle concordance tend à montrer que le bassin défini selon la structure géologique (Fig. 1) est surestimé.

Quelques résultats supplémentaires concernent les interactions entre l'aquifère principal du Malm, l'aquifère du Crétacé et les petits aquifères quaternaires du bord sud de la Vallée de Joux.

- L'aquifère du Malm alimente en grande partie la source du Brassus située dans le Crétacé.
- Le Crétacé du synclinal des Amburnex alimente l'aquifère du Malm, toutefois cette région doit être essentiellement drainée vers les sources du Pied du Jura (Toleure, Aubon-

ne, Montant). Le Crétacé des Grands Plats alimente en grande partie la source du Brassus. Il est probable que l'eau traverse le Crétacé pour rejoindre l'aquifère principal du Malm; toutefois des écoulements exclusivement dans le Crétacé ne sont pas à exclure.

- La source du Biblanc, issue du Crétacé, et située 65 m plus haut que la source du Brassus, peut être considérée comme un trop-plein de cette source.
- Enfin, les eaux du Crétacé du synclinal des Grand-Plats débordent, au moins à certaines périodes de l'année, vers le NW et sous-alimentent les petits aquifères quaternaires du flanc SE de la Vallée de Joux.

Cette étude a donc permis de cerner un peu mieux le fonctionnement des aquifères du Malm et du Crétacé alimentant la source du Brassus; elle illustre à nouveau la complexité des écoulements souterrains dans le Jura plissé et l'ambiguïté de la délimitation d'un bassin d'alimentation.

Remerciements

Nous tenons à remercier le laboratoire de géologie de l'EPFL (GEOLEP) et son directeur A. Parriaux qui nous ont ouvert leurs archives ainsi que l'administration communale de la commune du Chenit qui nous a autorisé à publier les données relevant du rapport des zones de protection de la source du Brassus.

Nous ne saurions oublier les spéléologues du club de la Vallée de Joux (SCVJ) pour leur efficace collaboration lors des deux essais de traçage au gouffre de la Pleine Lune.

Le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel a soutenu ces recherches en mettant à disposition du matériel, des traceurs et des analyses à des prix défiant toute concurrence. La commission scientifique de la Société Suisse de Spéléologie (SSS) a rendu possible le lancement de cette étude en mettant en contact les spéléologues avec le milieu scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEMANN, R. & MDAGHRI ALLAOU, A. 1991: Evaluation comparative de différents traceurs artificiels en hydrogéologie et méthodologie d'analyse. Bull. d'Hydrogéol. Neuchâtel, 10, 1-10.
- AUBERT, D. 1941: Carte géologique Vallée de Joux. Atlas géol. Suisse 1:25'000 et Not. explic.
- 1943: Monographie géologique de la Vallée de Joux. Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] 78.
- AUBERT, D., BADOUX, H. & LAVANCHY, Y. 1979: La carte structurale et les sources du Jura vaudois. Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 74, 333-343.
- BESSON, O. 1993: Méthodologie des essais de traçage en milieu fissuré alpin: exemple du synclinal permo-carbonifère de Salvan-Dorénoz. Rapp. FNRS non publ.
- BAUDET, J. 1974: Coloration au gouffre de la Cascade. Le Trou 5 (J. Groupe spéléo. Lausanne), 11-15.
- CHRISTEN, D., HEISS, G. & PERRIN, J. 1995: Deux nouveaux gouffres dans le Jura Vaudois: le gouffre de la Pleine Lune et le gouffre du Casque. Actes 10^{ème} Congr. natl. spéléo. Breitenbach 1995.
- FOREL, F.-A. & AUBERT, S. 1898: Origine des eaux du Brassus. Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 34: 38 et 53.
- CSD. 1990: Expertise hydrogéologique sur la pollution de la source du Brassus. Expert. non publ.
- FALCONNIER, A. 1951: Carte géologique Marchairuz. Atlas géol. Suisse 1:25'000 et Not. explic.
- GEOLEP. 1991: Etude des zones de protection de la source du Brassus. Etude 8718. Expert. non publ.

- HEISS, G 1996: Le gouffre de la Pleine Lune. Le Trou 60 (J. Groupe spéléo. Lausanne), 7–18.
- JEANBLANC, A. & SCHNEIDER, G. 1981: Etude géologique et hydrogéologique du Risoux – Mont d'Or. Thèse Univ. Besançon, 155 p.
- PERRIN, J. & JEANNIN, P-Y. 1996: Quelques observations dans le gouffre de la Pleine Lune. Le Trou 60 (J. Groupe spéléo. Lausanne), 19–23.
- LABORATOIRE CANTONAL 1980: Coloration dans un sondage situé au lieu dit „Molards-sur-le Brassus“. Expert. non publ.
- PARRIAUX, A. & MAYORAZ, R. 1990: Fragilité des ressources en eau du Jura ou le jeu des probabilités à la Vallée de Joux. Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 113, 107–114.
- PARRIAUX, A., MANDIA, Y. & DUBOIS, J-D. 1990: The concept of protection zones in karstic mountains. Mem. 22nd Congr. IAH Lausanne, 22, 1136–1143.
- PETCH, M. 1970: Etude hydrogéologique de la plaine de l'Orbe. Thèse Univ Lausanne.
- TRIPET, J-P. 1973: Etude hydrogéologique du bassin versant de la source de l'Areuse. Matér. Géol. Suisse, Sér. hydrol., 183 p.

Manuscrit reçu le 11 novembre 1999

Révision acceptée le 20 janvier 2000

