

Zeitschrift:	Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber:	Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band:	90 (1997)
Heft:	2
Artikel:	Intégration des méthodes hydrochimiques, géologiques et géophysiques pour la prospection d'une nouvelle ressource en eau thermale : cas d'Yverdon-les-Bains, pied du Jura
Autor:	Muralt, Reto / Vuataz, François-D. / Schönborn, Gregor
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-168153

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Intégration des méthodes hydrochimiques, géologiques et géophysiques pour la prospection d'une nouvelle ressource en eau thermale. Cas d'Yverdon-les-Bains, pied du Jura

RETO MURALT¹, FRANÇOIS-D. VUATAZ¹, GREGOR SCHÖNBORN², ANNA SOMMARUGA² & JACQUES JENNY³

Key words: Thermal water, carbonate aquifer, structural model, hydrochemistry, isotopes, seismic reflection, deep borehole
Mots clés: Eau thermale, aquifère carbonaté, modèle structural, hydrochimie, isotopes, sismique réflexion, forage profond

RESUME

Cette étude a pour but d'estimer les possibilités de trouver une eau thermale plus chaude et par conséquent à plus grande profondeur que celle qui est actuellement captée par le puits F4 du Centre thermal d'Yverdon-les-Bains. De nombreuses données provenant des lignes sismiques et des forages existants permettent d'avoir une bonne vision de la géologie structurale dans la région d'Yverdon. Cependant, ces données sont limitées concernant la zone de faille Pipechat-Chamblon-Chevressy (PCC) passant par Yverdon, et rendent difficiles l'interprétation structurale détaillée du site de l'ancienne source et du forage F4. Celui-ci draine des eaux dans le Malm près du plan de la faille sud, ce qui met en évidence l'importance du rôle hydraulique joué par la faille principale ou par un réseau de fractures associé.

Une campagne de vibroseisme réalisée dans la zone urbaine d'Yverdon à proximité du Centre thermal a permis de reconnaître l'emplacement précis de l'axe anticlinal formé par la zone de faille PCC. De plus, des réflecteurs bien individualisés ont permis d'évaluer les épaisseurs et la structure des dépôts quaternaires et molassiques de chaque côté de la zone de faille.

Les investigations hydrogéologiques permettent de détailler les différents rôles de la faille PCC. D'une part elle est responsable de la formation d'un ensemble de chenaux où se produisent une circulation lente de l'eau de la profondeur vers la surface et une circulation rapide du Jura vers le Plateau. D'autre part, la faille PCC forme une barrière hydraulique dans le sens nord-sud.

Seul le forage de prospection pétrolière de Hermigen dans le Seeland a fourni des informations sur les fluides profonds, notamment celui du Dogger. Les sources et les forages d'eau de la région d'Yverdon ont permis d'identifier les écoulements souterrains de la Molasse, du Crétacé et du Malm. L'observation de l'ancienne source et du forage F4 du Centre thermal révèle l'interaction qui existe entre les deux ouvrages. Notamment, l'exploitation artésienne du forage F4 a pour effet de refroidir et de diluer l'ancienne source thermale.

L'interprétation intégrée de la composition chimique des eaux du Centre thermal, leur évolution au cours du temps, ainsi que la comparaison avec le forage La Grève-1 d'Arkina accréditent l'hypothèse d'un aquifère plus chaud que celui du Malm. D'autre part, le gradient géothermique calculé pour le forage F4 ($3.7^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$) est légèrement supérieur à celui du forage La Grève-1 ($3.5^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$), ce qui indique l'effet de la remontée d'un fluide plus chaud dans la zone de faille PCC. Ce sont les calcaires du Dogger qui contiennent vraisemblablement un aquifère en-dessous du Malm, entre 1000 et 1400 m. L'hypothèse d'une origine du fluide à plus grande profondeur, c'est-à-dire dans les Trias, semble exclue, en raison de la composition chimique des fluides.

Les eaux captées par le Centre thermal (source thermale et puits F4) sont formées par un mélange de trois composantes principales.

- Une eau jeune, relativement froide et peu minéralisée: similaire à la source subthermale du Cossaux (14°C et 0.4 g/l).
- Une eau ancienne, chaude et peu minéralisée provenant du Malm: similaire au forage La Grève-1 d'Arkina (31°C et 0.34 g/l).
- Une eau ancienne plus chaude et plus minéralisée que celle du Malm: eau de type Na-Cl de l'aquifère du Dogger.

D'après les calculs et extrapolations, le fluide provenant du Dogger devrait avoir une température supérieure à 50°C et une minéralisation maximale de 5 g/l , avec présence de H_2S . En cas d'exploitation de l'aquifère du Dogger par un forage profond, il est probable que le forage F4 et l'ancienne source thermale verraienr leur température et leur minéralisation diminuer quelque peu.

Un forage vertical de 1400 m dans les formations géologiques situées sous la région d'Yverdon ne pose à priori pas de problèmes techniques de réalisation. Plusieurs méthodes de foration peuvent être envisagées, mais le choix sera dicté principalement par des considérations financières. Le site de forage idéal choisi en fonction de la structure géologique est compatible avec un chantier très proche du Centre thermal. Une coupe géologique prévisionnelle a été réalisée, mais comporte encore quelques incertitudes qui seront levées après les 250 premiers mètres de forage (Crétacé et toit du Malm). La cible finale retenue est représentée par les calcaires du Dogger, mais le forage devra suivre de près la zone de faille PCC, car c'est elle qui semble assurer une bonne perméabilité pour l'ensemble des écoulements souterrains régionaux.

ABSTRACT

The major goal of this study is to evaluate the potential of warmer and deeper groundwater than the one presently produced by the well F4 at the Centre thermal of Yverdon-les-Bains. Numerous data originating from seismic lines and boreholes allow to obtain a good understanding of the structural geology in the Yverdon area. However, these data are limited in the faulted zone of Pipechat-Chamblon-Chevressy (PCC) crossing the city of Yverdon, and make difficult the detailed structural interpretation on the site of the old thermal spring and well F4. The latter drains the Malm limestones near the southern fault plane, which shows the importance of the hydraulic role played by the main fault or by a network of associated faults.

A vibro-seismic survey carried out in the urban area of Yverdon, close enough to the Centre thermal, shows the precise location of the anticlinal axis along the PCC fault zone. Moreover, individual reflectors have been deciphered and allow to evaluate the thickness and the structure of the quaternary and molassic sediments on both sides of the fault zone.

¹ Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 11, rue E. Argand, CH-2007 Neuchâtel

² Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, 11, rue E. Argand, CH-2007 Neuchâtel

³ Géologie-Géophysique, 25, route des Acacias, CH-1227 Carouge

Hydrogeological investigations allow to detail the different roles of the PCC fault. On the one hand it allows a slow water flow rising from depth to surface and a rapid circulation from the Jura to the Plateau. On the other hand, the PCC fault forms a hydraulic barrier in the north-south direction.

Only the oil exploration borehole at Hermiringen in the Seeland gave indications on deeper fluids, namely those in the Dogger formation. Springs and water wells of the Yverdon area allowed to identify groundwaters from different horizons: the Molasse, the Cretaceous and the Malm. Thorough observations of the old thermal spring and of the well F4 reveal the interaction existing between the two groundwaters tapped. Indeed, the artesian exploitation of the well F4 results in the partial dilution and cooling of the old thermal spring.

Integrated interpretation of the chemical composition of the groundwaters from the Centre thermal, their evolution with time, as well as the comparison with the borehole La Grève-1 from Arkina credit the hypothesis of a fluid warmer than in the Malm aquifer. Moreover, the geothermal gradient calculated for the well F4 ($3.7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) is slightly above the one found in the borehole La Grève-1, which indicates the effect of an upflow of warmer fluids in the PCC fault zone. Consequently, the Dogger limestones are considered as the probable aquifer below the Malm, between 1000 and 1400 m below surface. The hypothesis of a fluid at even greater depths, namely in the Triassic sediments, seems to be excluded for hydrochemical reasons.

The groundwaters tapped at the Centre thermal (thermal spring and well F4) are the result of a mixing of three principal components.

- A recent groundwater, relatively cold and weakly mineralized: similar to the subthermal spring Le Cossaux (14°C and 0.4 g/l).
- An old groundwater, warm and weakly mineralized originating from the Malm: similar to the well La Grève-1 from Arkina (31°C and 0.34 g/l).
- An old, warmer and more mineralized groundwater than in the Malm: represented by a Na-Cl fluid of the Dogger aquifer.

From calculations and extrapolations, the fluid from the Dogger should have a reservoir temperature above 50°C and a maximum mineralization of 5 g/l , including some H_2S . In case of exploitation of the Dogger aquifer through a deep borehole, it is possible that the temperature and mineralization of the well F4 and the old thermal spring will decrease slightly.

The drilling of a vertical 1400 m-deep borehole in the geological environment of Yverdon-les-Bains will not cause a priori technical problems. Several drilling methods can be envisaged, but the choice will be done mainly for cost reasons. The well site chosen on the indications of the structural geology is compatible with the proximity of the Centre thermal. A tentative geological section has been realized, but it includes some uncertainties, which will be removed after the first 250 m of drilling (Cretaceous and top of the Malm). The final target is represented by the Dogger limestones, but the borehole will have to closely follow the PCC fault zone, because this fault is certainly responsible for the good permeability for the regional deep groundwater flows.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit dieser Studie soll abgeschätzt werden, ob für das Centre thermal in Yverdon-les-Bains ein Thermalwasser in grösserer Tiefe und damit von höherer Temperatur erschlossen werden kann, als das heute durch die Thermalwasseraufnahme F4 geförderte Wasser. Zahlreiche Daten aus bestehenden Bohrungen und seismischen Untersuchungen erlauben eine gute Interpretation der Geologie der Region Yverdon. Allerdings sind Anzahl und Qualität dieser Daten in Bezug auf die Störungszone von Pipechat-Chamblon-Chevressy (PCC) beschränkt. Die detaillierte struktureogeologische Interpretation dieser Zone, in der sich der heute genutzte Brunnen F4 und die alte Thermalquelle von Yverdon befinden, wird dadurch stark erschwert. Der Brunnen F4 sammelt die

Wässer aus dem Malm-Aquifer nahe der südlichen Überschiebungs-/Bruchfläche der Störungszone PCC, wodurch die wichtige hydraulische Rolle dieser Hauptstörungsfläche und/oder einer damit verbundenen Bruchschar aufgezeigt wird.

Eine vibroseismische Messkampagne beim Centre thermal in der Stadt Yverdon erlaubte es, den genauen Ort der durch die PCC-Störung gebildeten Antiklinalachse zu bestimmen. Zudem zeigten gut unterscheidbare Reflektoren Mächtigkeit und Struktur der quartären und tertiären Sedimente zu beiden Seiten der Störungszone.

Durch die hydrogeologischen Untersuchungen konnten zwei wichtige Funktionen der PCC-Störungszone erkannt und beschrieben werden. Einerseits bildet sie ein Netz von Zirkulationswegen für eine langsame Wasserströmung der Tiefengrundwässer gegen die Oberfläche sowie für eine schnelle Strömung aus dem Jura in Richtung Mittelland. Andererseits bildet die Störungszone eine hydraulische Barriere in Nord-Süd Richtung.

Einzig die Erdölbohrung von Hermiringen im bernischen Seeland ergab bisher Informationen über echte Tiefengrundwässer in der Region des Jurasüdfusses, im speziellen über Wasser im Dogger-Aquifer. Die Quellen und Brunnen der Region von Yverdon erlauben es, die Grundwässer in den Aquiferen der Molasse-, Kreide- und Malschichten zu charakterisieren. Die Beobachtung der Thermalquelle und des Brunnens F4 des Centre thermal zeigen eine hydraulische Verbindung der beiden Ausflussstellen: die Wasseraufbereitung am Brunnen F4 führt zu einer Abkühlung der Thermalquelle durch eine stärkere Verdunstung mit kühlerem Wasser.

Die detaillierte Interpretation der chemischen Zusammensetzung der Wässer des Centre thermal und ihrer Entwicklung im Laufe der Zeit sowie der Vergleich mit dem Brunnen La Grève-1 Arkina ergeben Hinweise auf die Existenz eines wärmeren Tiefenwassers als dasjenige des Malm. Zudem ist der berechnete geothermische Gradient des Brunnens F4 mit $3.7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ leicht höher als der Gradient im Brunnen La Grève-1 ($3.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), der sich im Norden, außerhalb der PCC-Störungszone befindet. Dies weist auf einen Aufstieg wärmeren Tiefenwassers in der PCC-Störungszone hin. Dieses Tiefenwasser zirkuliert vermutlich in den Kalken des Doggers in einer Tiefe von rund 1000 bis 1400 m unterhalb der Oberfläche. Eine Herkunft der Wässer aus noch grösserer Tiefe, das heisst aus den Schichten der Trias, erscheint aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung als nicht plausibel.

Die Wässer des Centre thermal (Brunnen F4 und Thermalquelle) bestehen aus einer Mischung von folgenden drei Hauptkomponenten.

- Ein junges, relativ kaltes und schwach mineralisiertes Wasser ähnlich der subthermalen Quelle von Le Cossaux (14°C und 0.4 g/l).
- Ein altes, warmes und ebenfalls schwach mineralisiertes Wasser aus dem Malm-Aquifer, ähnlich dem Wasser des Brunnens La Grève-1, Arkina (31°C und 0.34 g/l).
- Ein ebenfalls altes, aber wärmeres und stärker mineralisiertes Wasser vom Na-Cl Typ, vermutlich aus dem Dogger-Aquifer.

Nach Berechnungen und Extrapolationen sollte das Tiefengrundwasser im Dogger eine Temperatur mindestens 50°C und eine Mineralisation von weniger als 5 g/l aufweisen. Mit einer starken Präsenz von H_2S ist zu rechnen. Im Falle einer Erschliessung des Doggeraquifers ist eine gewisse Abkühlung der Wässer der Thermalquelle und des Brunnens F4 nicht unwahrscheinlich.

Einer subvertikalen Bohrung von 1400 m Tiefe in den Untergrund von Yverdon stehen a priori keine besonderen technischen Probleme im Wege. Verschiedene Bohrverfahren sind denkbar, wobei die Auswahl der Methode vor allem ökonomisch begründet sein wird. Der struktureogeologisch ideale Bohrstandort liegt nahe beim Centre thermal. Ein geologisches Detailprofil wurde erstellt, es enthält jedoch noch einige Unsicherheiten die sich aber nach den ersten 250 Bohrmetern aufklären werden. Das Bohrziel sind die Kalke des Doggers, die Bohrung muss allerdings eng der PCC-Störungszone folgen, ist es doch diese, die offensichtlich eine gute Wegsamkeit für die regionalen Grundwasserströmungen garantiert.

1. Introduction et but de l'étude

La zone thermale d'Yverdon-les-Bains se trouve en bordure de la plaine alluviale de l'Orbe, à l'extrême sud-ouest du lac de Neuchâtel. A l'ouest, des collines s'élèvent progressivement en direction du Jura. Dans la zone urbaine d'Yverdon-les-Bains, la Molasse chattienne (molasse d'eau douce inférieure) repose sous des dépôts quaternaires d'épaisseur variable. Sur le site d'émergence de la source thermale, la Molasse étant absente, l'eau sort directement des calcaires du Crétacé inférieur (Berriasiens-Hauterivien) et s'écoule dans les alluvions quaternaires (Burger & Gorhan 1986).

La source thermale d'Yverdon ainsi que plusieurs sources subthermales émergeant au pied nord du Mont de Chamblon sont localisées le long d'une zone de faille orientée E-W. La source thermale d'Yverdon-les-Bains (20–25°C) était connue à l'époque romaine déjà, et elle a été utilisée depuis le XVI^e siècle jusqu'à nos jours, avec quelques périodes d'interruption. Le puits de 14 m, dans son état actuel, date de 1914, et sert de captage à cette source. Celle-ci n'est plus utilisée, depuis qu'en 1981 un forage de 600 m de profondeur (F4) a été exécuté dans les calcaires du Malm à côté de la source, et mis en production (29°C) pour les besoins du Centre thermal. Finalement, à 1200 m au nord de la source thermale, un deuxième forage profond de 666 m (La Grève-1) a été réalisé dans les calcaires du Malm pour le compte de l'usine d'embouteillage Arkina en 1987 (Schneemann et al. 1991).

De nombreuses études, dans les domaines de la géologie, de la prospection pétrolière et géothermique, de l'hydrogéologie et du thermalisme ont été menées dans la région yverdon-

noise depuis une quarantaine d'années (Büchi et al. 1965, Burger & Gorhan 1986, Jordi 1955, Jordi 1993, Kern 1982, Vuataz 1982, Zahner et al. 1974).

Plus récemment, des études hydrogéologiques et hydrochimiques ont été conduites depuis 1992 par le Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel (CHYN) dans la région d'Yverdon-les-Bains. Au cours de cette étude, l'hypothèse a été émise que le fluide capté par la source thermale et le forage F4 du Centre thermal est formé d'au moins trois composantes (Muralt 1996), dont l'une d'entre elles proviendrait d'un aquifère sous le Malm, vraisemblablement dans les calcaires du Dogger et serait donc plus chaude.

L'idée de l'existence d'un aquifère potentiel dans les calcaires du Dogger au pied sud du Jura n'est pas nouvelle, et cette hypothèse a déjà été largement commentée dans le cadre d'un projet de prospection géothermique (Burger & Gorhan 1986), basée à l'époque sur des travaux de géophysique et les résultats du forage de prospection pétrolière de Hermrigen dans le Seeland bernois.

Vuataz et al. (1995) ont synthétisé l'ensemble des connaissances géologiques et hydrogéologiques de cette zone thermale. Le but de cette étude était de réunir les critères devant permettre de décider de la réalisation d'un forage géothermique profond jusqu'au Dogger. Pour compléter les informations des profils de sismique réflexion des prospections pétrolières, une campagne vibrosismique haute résolution (Géologie-Géophysique 1995) a été entreprise sur le même site. Cet article présente un résumé des résultats scientifiques des travaux menés depuis 1992.

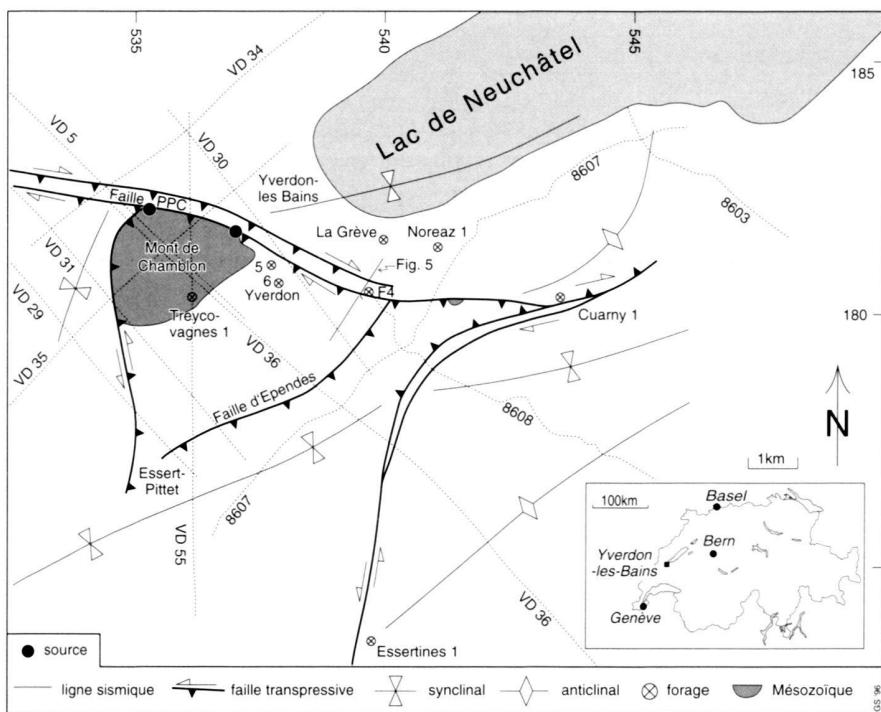


Fig. 1. Carte structurale avec localisation des lignes sismiques et des forages. Faille PCC = Faille Pipechat-Chamblon-Chevressy. F4 = Forage F4, site de la source thermale et du Centre thermal d'Yverdon-les-Bains.

2. Données à disposition

Les données de la géologie de surface sont tirées des publications de Jordi (1955 et 1993) et de la carte géologique au 1:25 000 d'Yverdon-les-Bains (Jordi 1994).

Les informations de la subsurface, ont été obtenues grâce à l'interprétation d'un réseau dense de lignes sismiques, enregistrées lors de deux campagnes différentes: une campagne entre 1973 et 1975 de la compagnie pétrolière Shell (lignes VD05, 29, 30, 31, 34, 35, 36 et 55), et une campagne en 1986 de la Société anonyme des Hydrocarbures (SADH 8603, 8607 et 8608, fig. 1). Les lignes sismiques de la compagnie Shell ont pu être consultées au Musée de Géologie de Lausanne (Shell 1978).

Les données géologiques, hydrogéologiques et thermiques des nombreux forages localisés dans la région d'étude sont aussi très importantes (fig. 1). Outre les puits réalisés pour le Centre thermal (Burger & Gorhan 1986; Centre Thermal d'Yverdon-les-Bains 1982–1994), d'autres puits ont été forés par l'industrie pétrolière: Cuarny-1 en 1940 (Althaus 1947), Essertines-1 en 1963 (Büchi et al. 1965) et Treykovagnes-1 en 1978 (Shell 1978). Les puits Noréaz-1 et La Grève-1 ont été forés en 1984 et 1987, respectivement pour la prospection et la production d'eau minérale de l'usine d'embouteillage Arkina (Schneemann et al. 1991).

D'autres données sont fournies par Sommaruga (1996): la carte des isopaques (épaisseurs identiques) des séries du Trias et la carte des isohypsides (altitudes identiques) du toit du socle cristallin et du toit du Dogger qui sont basées sur l'interprétation et la conversion en profondeur d'un grand nombre de lignes sismiques et de données géologiques de surface du canton de Neuchâtel et du canton de Vaud. Ces cartes présentent un cadre régional nécessaire pour l'établissement du modèle plus local.

De nombreuses données sont disponibles sur la chimie des fluides des sources et forages dans les études et rapports de Burger & Gorhan (1986), Schneemann et al. (1991), Kern (1982), Muralt (1996), Vuataz (1982), ainsi que dans les rapports internes d'archives trouvées à Yverdon-les-Bains, Neuchâtel et Lausanne.

Les rapports des forages pétroliers de Treykovagnes et de Cuarny n'ont malheureusement pas fourni de données chimiques. Les seules informations chimiques concernant l'aquifère du Dogger dans un forage profond au pied du Jura en Suisse occidentale sont celles d'un rapport non publié sur le forage pétrolier de Hermrigen près de Biel (Housse 1982). Dans ce forage un fluide moyennement minéralisé a été trouvé dans le Dogger à une profondeur d'environ 1200–1400 m.

3. Aspects géologiques et structuraux

3.1 Introduction

La région d'Yverdon, située au pied sud de la chaîne du Jura, est recoupée par deux groupes de failles décrochantes à mouvement conjugué. L'orientation de ces failles tourne avec la

forme arquée du Jura. Près d'Yverdon, les failles sénestres sont orientées N-S, tandis que les failles dextres sont orientées E-W à ESE-WNW. Une zone complexe de failles dextres avec au moins deux branches de failles bien distinctes (branche nord et branche sud) s'étend de Cuarny à l'est, vers la Plaine de Baulmes à l'ouest (fig. 1). Cette zone de failles a été nommée Piéechat-Chamblon-Chevressy (PCC) par Jordi (1993). Plusieurs failles sénestres orientées N-S rejoignent la zone PCC: la première suit la ligne Cuarny-Essertines-Echallens, une autre longe le bord ouest du Mont de Chamblon et une troisième s'étend de la Plaine de Baulmes à Rances et Orbe (fig. 1 et carte géologique d'Yverdon-les-Bains (Jordi 1994)). Toutes ces failles ont en plus du mouvement décrochant une composante chevauchante: ce sont des failles transpressives.

Les régions situées au SE de l'intersection des failles sénestres et des failles dextres représentent par conséquent des indentations pointant vers le NW. Ces zones sont soit surélevées par un chevauchement à vergence NW (Mont de Chamblon) ou effondrées sous un rétro-chevauchement à vergence SE (à l'ouest de Cuarny 1, fig. 1). Comme le suggère Jordi (1993), une autre faille inverse nommée faille d'Epènes s'étend de l'est du Centre thermal d'Yverdon vers Essert-Pittet (fig. 1). Dans la région d'Yverdon, les sources d'eau importantes sont toutes localisées le long de ces failles.

3.2 Méthodologie

Afin de reconnaître les structures géologiques autour de la zone de faille passant par Yverdon-les-Bains, les lignes sismiques interprétées ont été converties en profondeur à l'aide des vitesses fournies par le log sonic du puits de Treykovagnes et par les vitesses sismiques publiées par la CEDRA (Naef & Diebold 1990). Le rassemblement et la corrélation de toutes les données ont permis d'élaborer un modèle structural des environs d'Yverdon, à l'exception de la zone PCC. Dans cette zone, les réflecteurs sismiques sont flous et les rares réflecteurs doivent être projetés soit latéralement sur plusieurs kilomètres, soit en profondeur à travers des niveaux de décollement. Les données indiquent que le forage F4 est situé à l'intérieur de la zone de faille, et par conséquent, la géométrie entre les branches nord et sud de cette zone est critique pour l'interprétation du cheminement des eaux. Il était nécessaire de mieux comprendre les structures à l'intérieur de la zone de faille, bien que les données de la sismique pétrolière soient de mauvaise qualité et que tout géologue interpréteur de lignes sismiques resterait prudent, voire n'interpréterait pas cette zone (p. ex. Jordi 1993).

Pour élaborer ce travail, les lignes sismiques les plus proches du Centre thermal (SADH 8606, 8607 et VD30) ont été examinées en détail en ce qui concerne les réflecteurs au sein de la zone faillée.

Le pendage N des couches observé dans la zone de faille PCC en combinaison avec des arguments de géologie structurale ont permis de construire les coupes des figures 2 et 3 parallèlement aux lignes sismiques VD30 et SADH 8607, et la

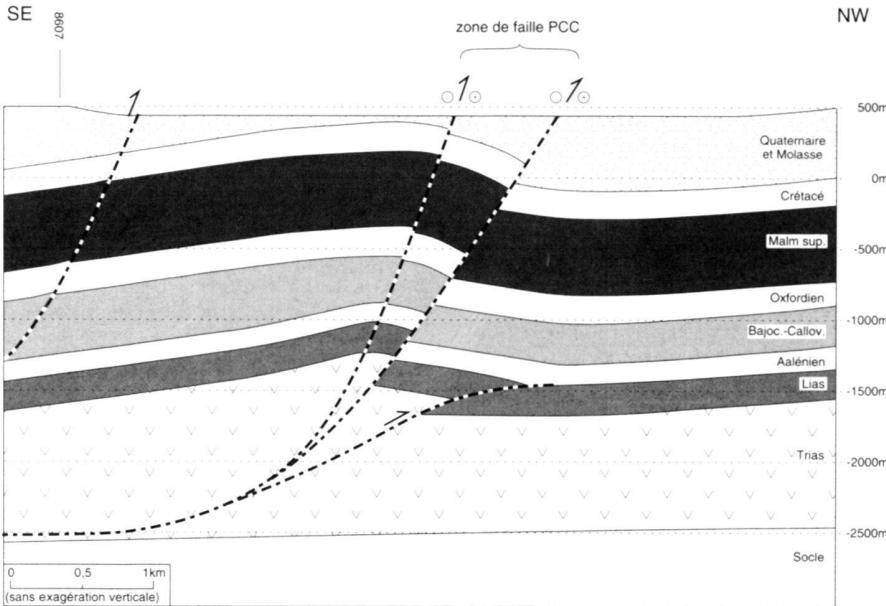


Fig. 2. Coupe SE-NW le long de la ligne sismique VD30.

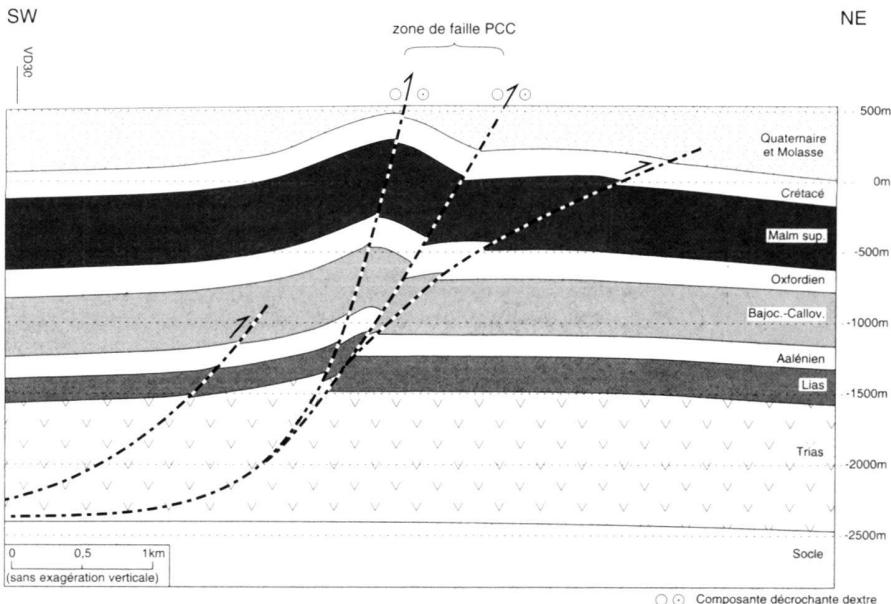


Fig. 3. Coupe SW-NE le long de la ligne sismique SADH 8607.

coupe de la figure 10 passant à travers le Centre thermal. Pour mieux comprendre l'aspect tridimensionnel de la région d'Yverdon-les-Bains, une carte des isohypses du toit du Dogger a été construite, basée sur ces coupes et les différents forages (fig. 4).

3.3 Modèle structural

Sur toutes les lignes sismiques recoupant la zone de faille PCC, les réflecteurs situés au sud de cette zone plongent légèrement vers le sud. A l'intérieur de cette zone, les réflecteurs plongent aussi faiblement vers le sud sur la ligne VD55 et sont subhoriz-

ontaux sur la ligne voisine VD35 (voir fig. 1 pour la localisation). Les plans de faille sont orientés vers le sud, si l'on prend en compte les réflecteurs repérés sur les deux lignes dans la zone de faille. La ligne VD30 recoupe la zone de faille non pas en direction perpendiculaire mais plutôt en direction oblique. Bien que la zone faillée n'apparaisse pas très nettement sur cette ligne, des réflecteurs des niveaux du Crétacé ou du Malm, plongeant vers le nord, peuvent être reconnus. Puisque les deux failles ont une composante de mouvement compressive et que, aussi bien le toit que le mur de toute la zone de faille sont bien représentés, la zone située entre les failles peut être construite sans trop de problèmes une fois le pendage des

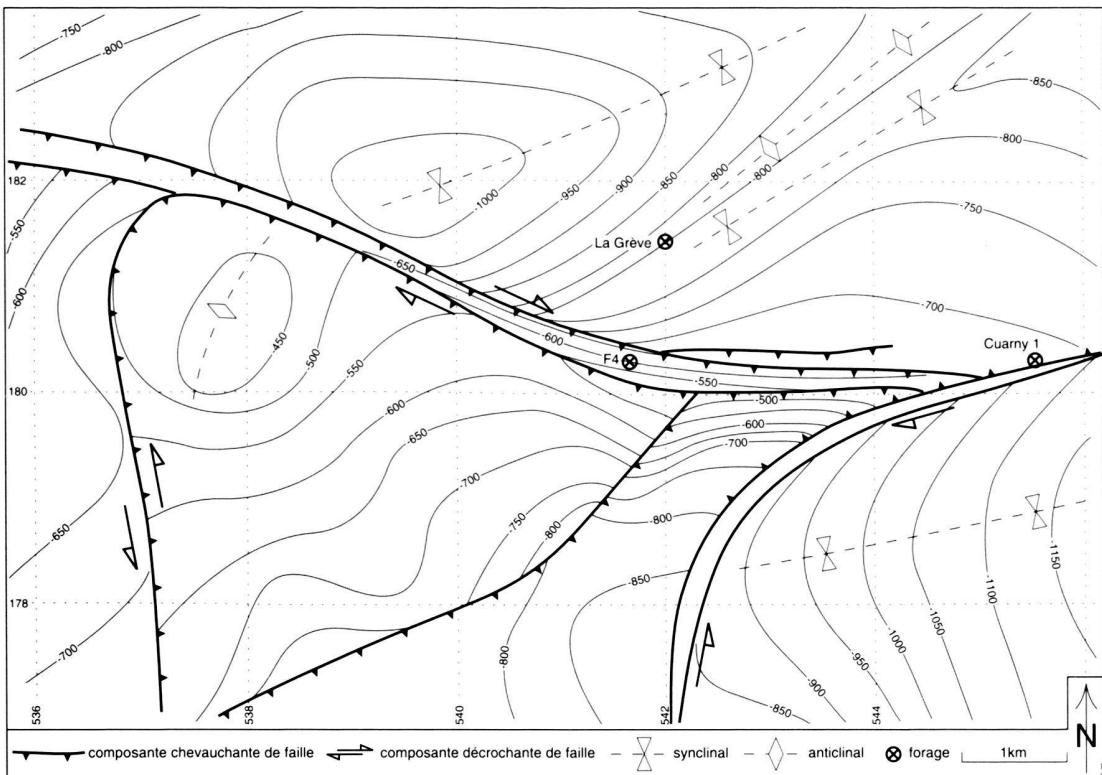


Fig. 4. Carte des isohypses du toit du Dogger dans la région d'Yverdon-les-Bains (cotes absolues).

couches connu. La structure proposée est un pli en relation avec deux failles recoupant le flanc frontal (fig. 2). Un troisième chevauchement en profondeur est inhérent à la structure, étant donné que les couches juste au nord des failles plongent légèrement vers le nord avant de devenir subhorizontales ou légèrement inclinées vers le sud.

Bien que la ligne SADH 8603 montre seulement le pendage sud des couches appartenant au mur de la zone PCC, d'autres informations peuvent être obtenues de la ligne 8607 à l'est du Centre thermal. A l'intérieur de la zone de faille, un réflecteur (vraisemblablement des niveaux du Crétacé) plonge vers le nord (fig. 3). Son pendage de 31°N est équivalent à celui de 27°N obtenu à partir de la ligne VD30, en tenant compte de l'obliquité de cette ligne par rapport à l'orientation des structures. Ainsi tout le reste de la structure se corrèle avec celle de la ligne VD30: un pli en relation avec deux failles recoupant celui-ci à travers les charnières et une troisième faille, moins inclinée et plus externe.

Les lignes sismiques et les résultats des forages mettent en évidence des changements d'épaisseur à travers la zone de faille PCC. L'épaisseur de la série liasique augmente vers le NE. Au contraire, les couches du Callovien-Bajocien et du Malm, s'amincissent vers le nord, en accord avec la tendance régionale (Sommaruga 1996). Dans tous ces cas, les changements d'épaisseur pourraient être dus à des failles normales mésozoïques.

La coupe N-S passant par le forage F4 (fig. 10), a été construite à partir des coupes interprétatives (figs 2 et 3). Le forage

F4 est interprété comme longeant de très près la branche sud de la zone de faille PCC, celle-ci atteignant la surface à l'endroit même de la source thermale (Blanc 1990). Les couches situées entre les deux branches de la faille plongent de 29° vers le nord, ce qui a été obtenu par la projection des résultats de VD30 à l'ouest et de SADH 8607 à l'est. Malheureusement, on ne possède pas de données structurales provenant du forage F4. Plusieurs zones de failles bien connues montrent que les structures au sein de celles-ci peuvent changer très rapidement parallèlement à la direction. La seule indication permettant une vérification de cette interpolation est un commentaire sur le log lithologique du forage F4 dans Burger & Gorham (1986), qui indique un pendage de 30° des couches (sans direction donnée). Cette information provient vraisemblablement des épaisseurs apparentes dans le forage, puisqu'aucune donnée structurale n'a été relevée durant et après le forage.

Le modèle structural résultant des données discutées ci-dessus est représenté par la carte des isohypses du toit du Dogger (fig. 4).

4. Etude sismique haute résolution

4.1 But et méthodologie

Etant donné que les lignes de la sismique pétrolière ne passent pas en zone urbaine, une campagne de vibrosismique a été engagée, pour compléter les profils existants, et obtenir une

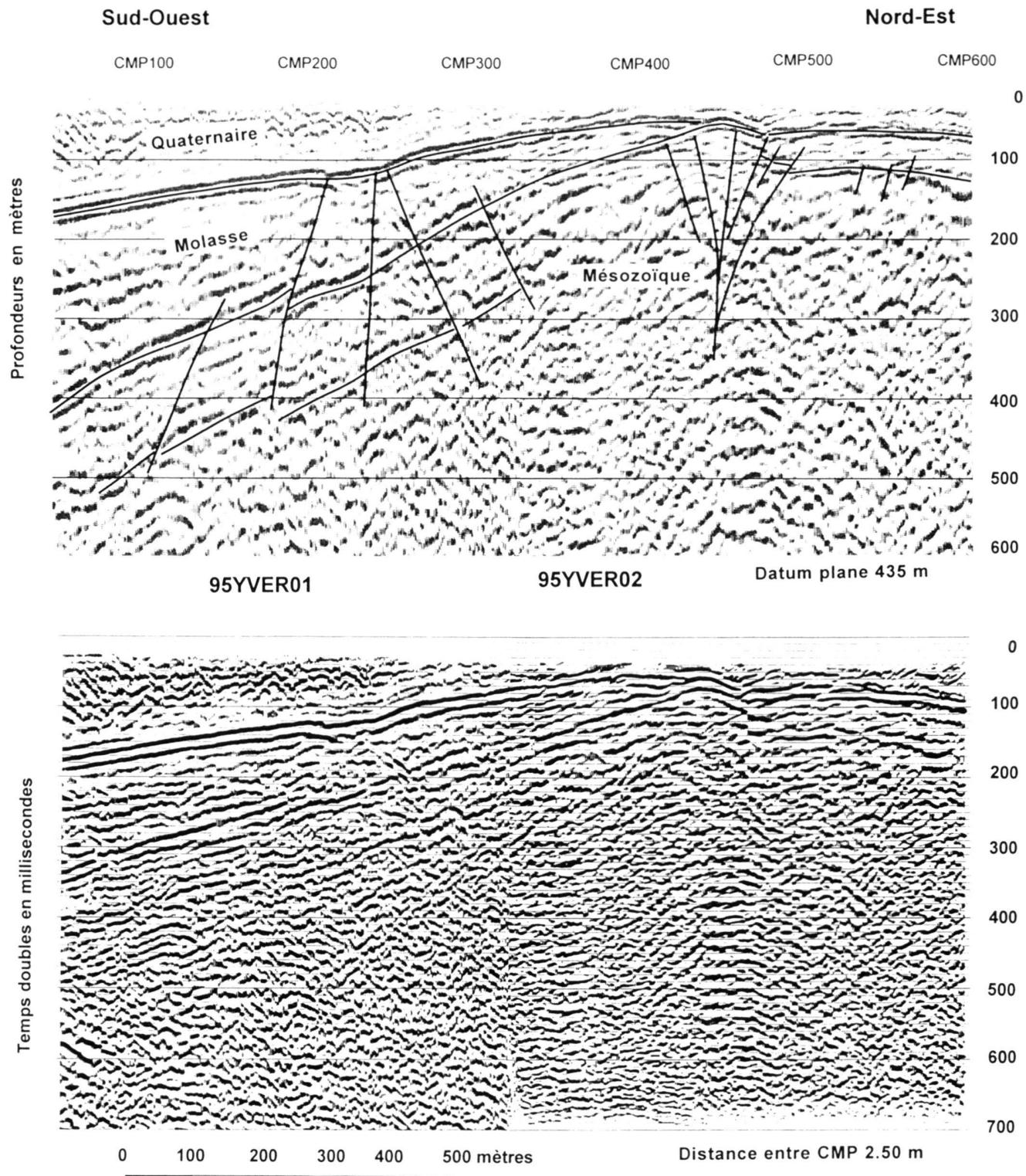


Fig. 5. Profil de vibroseismique haute résolution (non migré) et interprétation des structures géologiques et tectoniques.

image de la remontée des couches du Mésozoïque à proximité de la source thermale.

Le profil sismique séparé en deux parties (marqué Fig. «5» sur la fig. 1) avait pour but de localiser en profondeur la faille de Pipechat-Chamblon-Chevressy et de préciser les structures géologiques, notamment le toit des calcaires mésozoïques dans la zone du Centre thermal (Géologie-Géophysique 1995).

Un sismographe digital RX48 d'EG & G Geometrics a servi à enregistrer les données sur 48 canaux. Nonante six géophones de 10 hertz ont été posés tous les 5 mètres sur le terrain. Le temps d'écoute était de 1500 ms sans filtre à l'acquisition, excepté un filtre éjecteur (*notch*) de 50 hz.

Une remorque vibratrice d'un poids total de 2300 kg de type MiniVib de la société IVI a été utilisée comme source d'énergie. En effet, pour pouvoir travailler en zone urbaine, la vibrosismique est la seule méthode utilisable. La durée du balayage (*sweeps*) du vibrateur était de 8 secondes, entre 30 et 200 hz de fréquence. Le nombre de *sweeps* pour chaque point variait en fonction des résultats apparaissant sur l'écran de contrôle de l'enregistreur sismique.

Le profil 95YVER01, long de 1005 m, comprend 175 points de vibration qui avaient un offset de 5 m. Quant au profil 95YVER02, il compte 189 points de vibration, soit une longueur traitée de 1000 m avec un offset en ligne de 15 m.

Les données brutes ont été mutées (*surgical mute*), filtrées (LC 45 hz, HC 150 hz) avant d'entrer la géométrie et la mise en *Common Depth Point* (CDP). Les coupes ont été ensuite déconvolées.

4.2 Interprétation

Les deux profils qui se recouvrent largement ont été mis bout à bout afin de mieux visualiser les structures géologiques (fig. 5). Sur le profil, on distingue plusieurs réflecteurs très marqués à pendage sud. Ces réflecteurs s'approchent de la surface à l'extrême nord du profil. Sur la coupe on observe plusieurs hyperboles dues à des failles, en particulier au *Common Mid Point* (CMP) 260. A l'aplomb du CMP 160 apparaît une structure très particulière, les réflecteurs forment un dôme, puis plongent vers le nord. Il s'agit certainement de l'axe anticlinal tectonisé de la zone PCC (comparer fig. 2 et fig. 3). Au nord de cet axe, les structures sont plus difficiles à discerner, ceci en raison des complications tectoniques et du pendage vers le nord.

Le premier bon réflecteur représente le contraste de lithologie entre les couches d'âge quaternaire et celles d'âge tertiaire. Les dépôts quaternaires se sont déposés au-dessus d'une surface d'érosion post-tectonique, caractérisée par une discordance angulaire. La vitesse de cet intervalle est de 1900 m/s et caractérise bien ces types de dépôt. L'épaisseur de ces sédiments diminue à l'aplomb de la ride de la zone PCC pour augmenter de nouveau de puissance au nord. Au droit de la ride le recouvrement est de l'ordre de 45 mètres. En fin de profil, il y a près de 60 mètres d'alluvions, ce qui est parfaitement compatible avec les données du forage d'Arkina.

Le deuxième réflecteur important qui remonte vers la surface au CDP 160 est attribuable au sommet des calcaires

Tab. 1. Les différents types d'eau présents dans la zone d'Yverdon et à Hermrigen.

Localisation	Aquifère	Profondeur venues d'eau (m)	Température (°C)	TSD (mg/l)	Type chimique	Débit (m³/h)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)
Source La Prairie	Molasse	9.2	9-13	1'000-1'400	Ca,Mg-SO ₄ ,HCO ₃	0.5-2.5	14-40	275-560
Sources Bel Air	Molasse	galerie	9-10	900-2'000	Ca,(Mg)-SO ₄ ,HCO ₃	1.8-3.0	15-30	250-1'000
Forage Bel Air	Molasse	~140	~13	2'600-3'000	Ca,Na-SO ₄	0.5	60-65	1'500-1'700
Forage Noréaz 1	Molasse	~97	14	1'800	Ca,Na-SO ₄	1.4	105	1'850
Forage Noréaz 3	Molasse	~235	12-16	2'500-3'200	Ca-SO ₄	0.7	19-30	1'500-1'900
Forage La Grève 2	Molasse	20, 72, 113	26	8'000	Na-SO ₄	0.7	750	4'600
Source Roulequet Mont de Chamblon	Crétacé	---	9-10	~600	Ca-HCO ₃	0.06-1.8	4-11	20-60
Forage Noréaz 1	Crétacé	-418-556	26-32	300-340	Ca,Mg,Na-HCO ₃	3.0	4-6	6-20
Source Les Fontanets La Mothe	Malm	0	~8	300-350	Ca-HCO ₃	>>300	~4	~5
Sources Moulinet Mont de Chamblon	Malm	0	9-11	350-430	Ca-HCO ₃	40-250	2-11 ²⁾	10-30
Sources Le Cossaux Mont de Chamblon	Malm	0	13.5-14.5	370-400	Ca,Mg-HCO ₃	30-300	3-6	10-17
Forage Bevaix Treytel	Malm (Portl.)	~300	9-14	~400	Ca,Mg-HCO ₃	125	2-5	2-7
Forage Arkina La Grève-1	Malm (Portl.)	~635	31-32	330-340	Ca,Mg-HCO ₃	~12	2.5-3.5	10-15
Source thermale	Malm + ?	~11	18-25	390-500	Ca,Mg,Na-HCO ₃ ,Cl	5-11	14-85	9-20
Forage F4	Malm + ?	~470	~29	~380	Ca,Mg-HCO ₃	~18	8-27	10-17
Forage Hermrigen	Dogger	~1'300	~50	5'400	Na-Cl, HCO ₃	~10	1'560	235
Forage Hermrigen	Keuper	~1'800	>56	282'000	Na-Cl	?	170'000	1'730

1) TSD: total des solides dissous (= minéralisation totale).

2) Teneur élevée en chlorure en raison de la pollution anthropogène.

Tab. 2. Températures mesurées et gradients géothermiques calculés pour les forages La Grève-1 et F4.

Forage	Profondeur de mesure	Température de diagraphe	Température en tête de puits (°C)	Gradient géothermique (°C/100 m)
Date	(m)	(°C)		
La Grève-1				
1987	666.4	33.2		3.48
1987	0		32.8 ¹⁾	3.59 ²⁾
01-10-87	0		32.0	3.47 ²⁾
28-07-94	0		31.5 ³⁾	3.39 ²⁾
moyenne				3.48
F4				
29.09.81	585	30.5 ⁴⁾		3.50
01.10.81	500	29.1 ⁴⁾		3.82
01.10.81	597	31.7 ⁴⁾		3.63
18.12.81	500	28.9 ⁴⁾		3.78
18.12.81	599	31.4 ⁴⁾		3.57
30.04.84	500	28.0 ⁴⁾		3.60
07.05.84	502.5	29.0 ⁴⁾		3.78
21-03-84	0		28.9 ⁵⁾	4.02 ⁶⁾
22.02.94	0		28.2 ⁷⁾	3.87 ⁶⁾
moyenne				3.73

1) Température maximale mesurée lors d'un essai de pompage (SCHMASSMANN 1991).
2) Le gradient géothermique est calculé avec la profondeur de 635 m d'après les résultats du flowmètre.

3) Température maximale mesurée en tête de puits entre juillet 1992 et décembre 1994 (MURALT 1996).

4) Diagraphies de température effectuées par GEOTEST (1984).

5) Température maximale mesurée plusieurs fois en tête de puits (CENTRE THERMAL 1982-1994).

6) Le gradient géothermique est calculé avec la profondeur de 635 m d'après les résultats du flowmètre.

crétacés, plus particulièrement le toit des calcaires urgoniens. Entre ces deux réflecteurs se trouvent les grès et les marnes de la Molasse d'eau douce inférieure.

Au-dessous, on entre dans la série mésozoïque. Les réflecteurs sont moins marqués en raison de contrastes de vitesses moins importants et de la présence de nombreuses failles. La karstification du sommet des calcaires peut aussi atténuer la qualité du réflecteur.

L'axe anticlinal se trouve à l'aplomb du CMP 160, soit géographiquement 60 m au NE du pont de la rue d'Entremonts sur le Buron. La zone de faille s'étend sur 250 mètres environ. Au nord de l'anticlinal, les sédiments molassiques réapparaissent brusquement.

5. Situation hydrogéologique et rôle de la zone de faille PCC

La plaine de l'Orbe et particulièrement les sites de la source thermale d'Yverdon et des sources subthermales du Mont de Chamblon (seuls exutoires naturels de circulations profondes connues dans la région) constituent un axe de drainage régional. La remontée de fluides profonds est facilitée par la faille PCC (Jordi 1993) qui est à l'origine de la source thermale d'Yverdon et des sources subthermales du Mont de Chamblon. Au droit de la faille sud de la zone PCC, les calcaires aquifères du Crétacé et du Malm sont dégagés de la couverture molassique

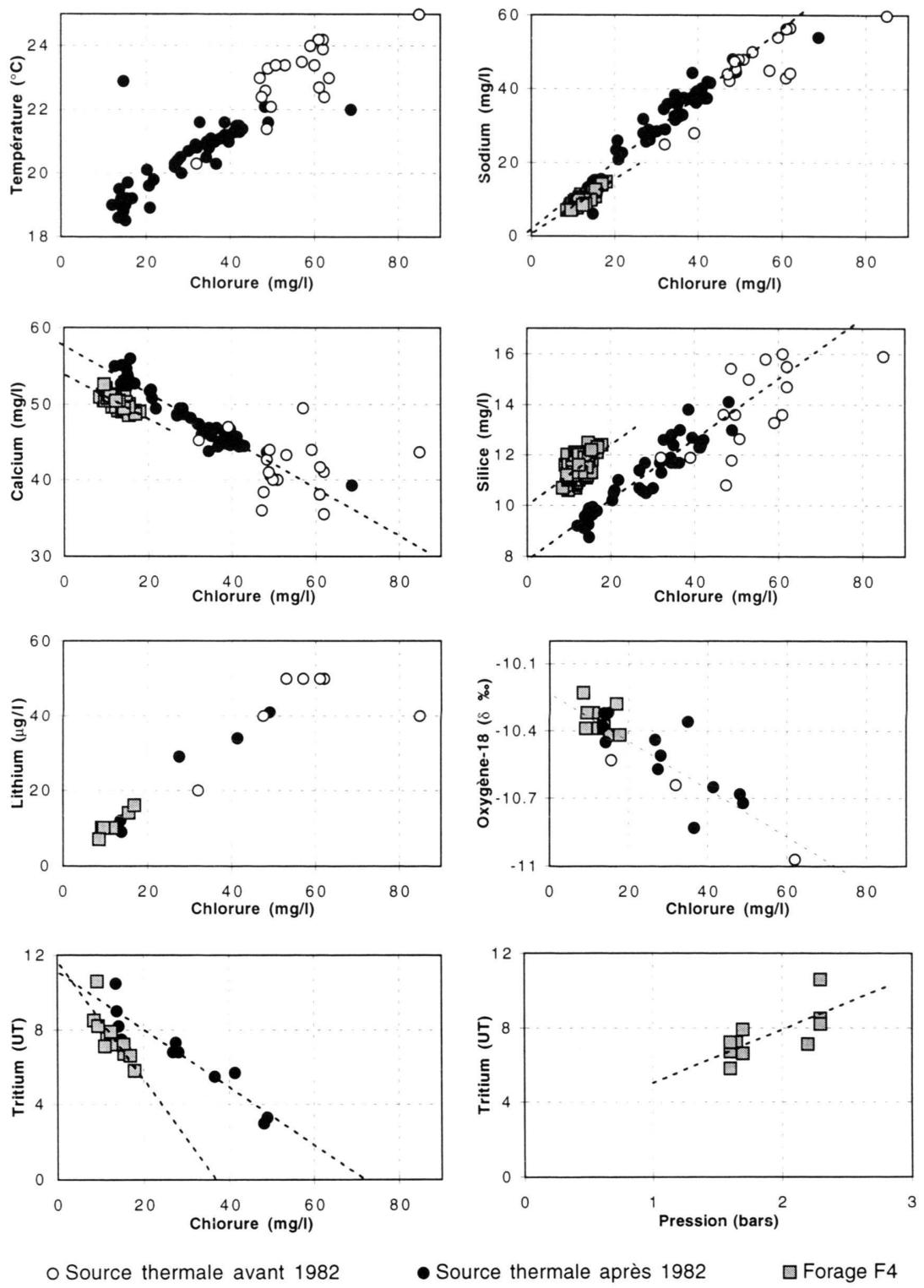
très peu perméable au Mont Chamblon et au lieu même du Centre thermal, ce qui explique le rôle d'exutoire naturel de ces deux zones. Dans l'étude de Burger & Gorhan (1986), deux indices suggèrent la remontée d'un fluide plus profond que celui du Malm: (1) un modèle thermohydraulique des circulations du Centre thermal conclut à un apport d'eau de plus grande profondeur que l'Oxfordien et (2) une diagraphie de type *fluid-resistivity log* dans le forage F4 en 1984 a montré une résistivité de l'eau constante sur toute la hauteur du forage de 0-480 m. Sur les derniers 20 mètres du forage accessibles à l'outil une forte diminution de la résistivité indique l'arrivée d'eau plus minéralisée et plus profonde.

5.1 Zones d'exutoire

L'alignement de sources subthermales (Le Moulinet, Gruvy, Praz Barbey, Le Cossaux et Les Huttins au Mont de Chamblon; voir les points noirs sur la fig. 1 et Jordi 1994) et thermale (source d'Yverdon) le long de la faille PCC prouve que celle-ci a créé des fractures conductrices d'eau au moins jusqu'à la profondeur du Kimméridgien moyen (480 m dans le forage F4). Sans cette zone de faille, des circulations importantes dans les roches du Malm seraient peu probables, la porosité primaire n'étant que très faible (Kiraly 1973). L'eau profonde du forage La Grève-1 d'Arkina prouve, qu'à Yverdon des fractures conductrices d'eau existent au moins jusqu'à la profondeur de 640 m sous le niveau du sol (Schneemann et al. 1991).

La teneur en chlorure dans l'eau du puits La Grève-1 est constamment très basse (2.5-3.0 mg/l), alors qu'elle est nettement plus élevée au Centre thermal (Forage F4: 8-16 mg/l; Source: 15-50 mg/l). La présence de ce chlorure dans les captages du Centre thermal doit provenir d'un fluide plus profond que les couches du Kimméridgien (tab. 1). La remontée de ce fluide n'est pas simplement due à un phénomène de drainance à travers de l'Oxfordien. C'est la zone de faille elle-même qui la facilite, sinon la teneur en chlorure de l'eau Arkina devrait être également plus élevée.

Les nombreuses mesures de températures réalisées en tête de puits et lors des diagraphies sur les forages La Grève-1 d'Arkina et F4 du Centre thermal permettent de calculer le gradient géothermique et de mettre en évidence des différences locales significatives. C'est avec une température moyenne annuelle en surface admise de 10°C que les calculs du gradient géothermique ont été effectués (tab. 2). De manière générale, on constate que pour la région d'Yverdon, le gradient géothermique est quasiment toujours supérieur à 3.5°C/100 m, valeur légèrement plus élevée que celle que l'on attendrait dans les conditions structurales et hydrogéologiques du pied du Jura. D'autre part, le gradient calculé pour le forage La Grève-1 (moyenne de 3.48°C/100 m), situé au nord de la zone de faille PCC, montre des valeurs presque toujours inférieures à celles du forage F4 (moyenne de 3.73°C/100 m), situé sur la zone de faille. L'analyse des températures permet de confirmer qu'au niveau régional, on est en présence d'une zone d'exutoire, alors qu'au niveau local, un apport d'eau plus profonde re-



○ Source thermale avant 1982 ● Source thermale après 1982 ■ Forage F4

Fig. 6. Comportement de quelques paramètres physiques, chimiques et isotopiques dans la source thermale et le forage F4 du Centre thermal d'Yverdon-les-Bains en fonction de la concentration en chlorure. On observe que la source thermale et le forage F4 ne s'alignent pas pour tous les paramètres sur la même droite de mélange, indiquant ainsi le mélange d'eau moins trois composantes (p. ex.: Ca, SiO₂, tritium). La différence entre les valeurs de la source thermale avant et après la mise en service du forage F4 (1982) démontre l'influence de cet ouvrage sur la composition chimique et la température de la source thermale.

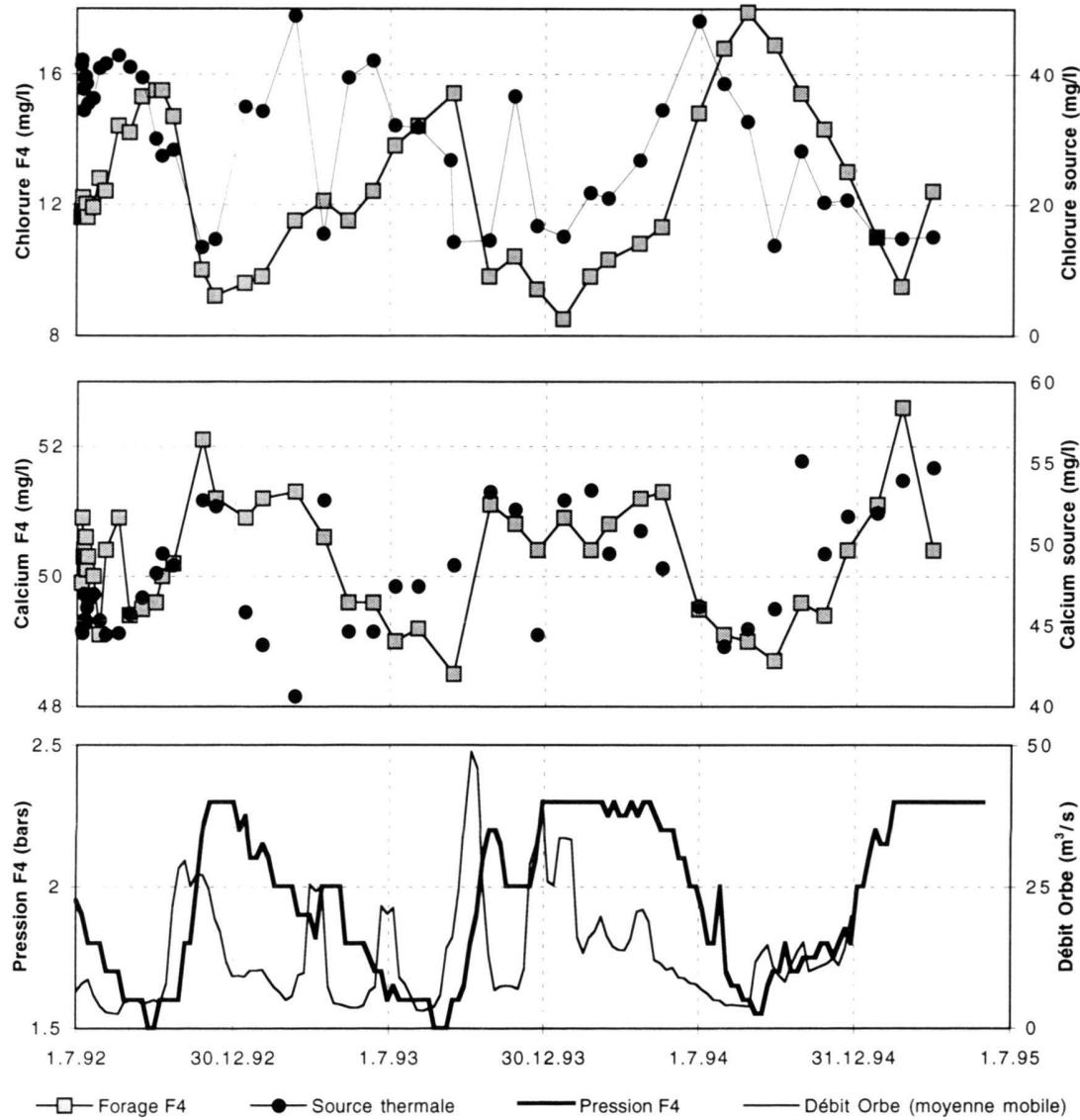


Fig. 7. Variations saisonnières sur trois années des teneurs en calcium et en chlorure dans la source thermale et le forage F4, ainsi que de la pression artésienne dans le forage F4. Pour comparer ces variations à celles du cycle hydrologique, le débit de la rivière Orbe à Orbe est également donné.

montant par la faille PCC explique la présence d'un gradient plus élevé au Centre thermal.

5.2 Circulations karstiques rapides

Plusieurs sources du Mont de Chamblon possèdent en plus de leur composante profonde des caractéristiques hydrauliques de type karistique: variations du débit grandes et rapides, débits et vitesse d'écoulement très élevés (Schardt 1910; Mautner 1975 et 1978; Kern 1982; Looser 1990). Les eaux de la source thermale et du forage F4 ont, elles aussi, une composante avec une vitesse d'écoulement rapide, ce qui est prouvé par la pré-

sence de tritium. Elles montrent des variations saisonnières de débit et de pression artésienne similaires aux variations de débit des rivières de la région. Une partie des fractures ouvertes de la faille PCC a donc été élargie en chenaux de circulation rapide. Les eaux circulant dans ce système diluent et refroidissent l'eau thermale.

5.3 Barrière hydraulique

Entre les zones sud (Centre thermal) et nord (Arkina) de la faille PCC, il existe un important rejet de quelques 200 m (fig. 2). Il est donc vraisemblable qu'une barrière hydraulique,

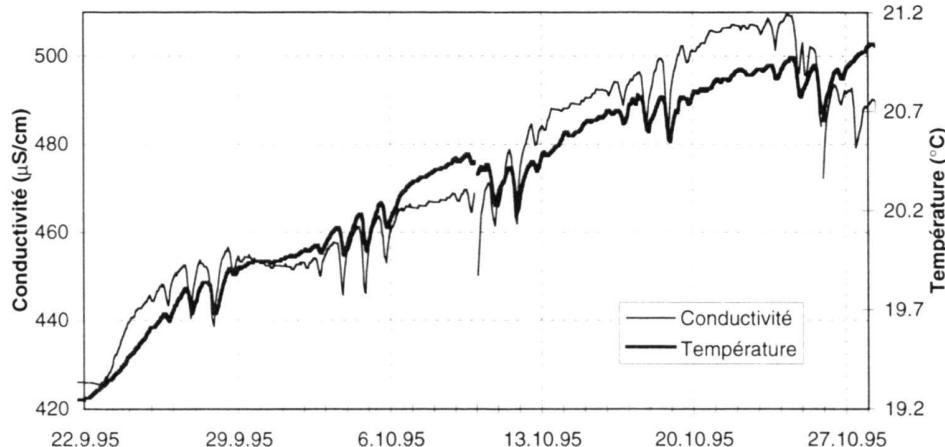


Fig. 8. Variations temporelles à court terme de la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et de la température ($^{\circ}\text{C}$) à l'ancienne source thermale d'Yverdon en septembre/octobre 1995. On remarque l'évolution parallèle de la température et de la conductivité électrique. Les battements quotidiens qui se répètent à un rythme hebdomadaire sont dus à la mise en production du forage F4 pour remplir les réservoirs du Centre thermal. Ce remplissage se fait toujours la nuit: de lundi à mardi (150 m^3), de mardi à mercredi (400 m^3), de mercredi à jeudi (455 m^3) et de jeudi à vendredi (130 m^3). La taille différente des réservoirs respectifs a pour conséquence une réponse variable des paramètres enregistrés à la source thermale.

limitant l'écoulement des eaux en direction N-S, ait ainsi été créée entre le Centre thermal et le forage La Grève-1 d'Arkina. Cet effet de barrière est prouvé par les essais de production au forage La Grève-1, qui n'ont montré aucune influence mesurable sur le forage F4 du Centre thermal (Schneemann et al. 1991). De plus, l'eau Arkina ne montre aucune variation saisonnière de son chimisme et de sa composition isotopique, contrairement aux eaux du Centre thermal.

5.4 Discussion

La faille sud fonctionne évidemment en tant que zone d'écoulement. Ceci est mis en évidence par l'alignement le long de la structure PCC des sources karstiques du Mont de Chamblon et de la source thermale d'Yverdon. L'écoulement des eaux souterraines est parallèle aux structures, c'est-à-dire plus important dans la direction W-E que dans la direction perpendiculaire N-S. Néanmoins, l'écoulement N-S suit l'inclinaison des couches vers le sommet de l'anticlinal, qui correspond géométriquement à la faille PCC. Cet aspect renforce le caractère d'exutoire de ce linéament.

L'absence de Molasse et la faible épaisseur de Quaternaire autorisent la présence d'exutoires en surface le long de la faille sud. Au contraire, la faille nord au cœur du synclinal est recouverte de sédiments tertiaires et quaternaires qui empêchent la remontée des eaux.

L'effet de barrière hydraulique démontré entre le forage La Grève-1 et celui du Centre thermal peut être expliqué par une interruption des cheminements stratiformes de l'eau souterraine dans la zone de la faille.

6. Investigations hydrochimiques

6.1 Méthodologie

Durant une période d'investigation de trois ans (1992–95) et avec une périodicité mensuelle, de nombreuses mesures physiques et analyses (chimiques et isotopiques) ont été effectuées

sur l'ancienne source thermale, le forage F4 du Centre thermal, le forage La Grève-1 d'Arkina, ainsi que la source subthermale Le Cossaux au Mont de Chamblon. Des mesures liées à l'exploitation des forages du Centre thermal et de l'usine Arkina ont également été interprétées conjointement avec toutes les données historiques.

6.2 Types d'eaux souterraines présents ou potentiels

Dans la zone d'Yverdon on trouve différents types d'eaux dans les aquifères entre le Quaternaire et le Malm. Des eaux provenant d'aquifères stratigraphiquement plus profonds que le Malm ne sont pas connues par manque de forages et d'affleurements. Par contre, des fluides dans les aquifères du Dogger et du Keuper ont été repérés dans le forage pétrolier de Hermrigen près de Bienne (Housse 1982). Le forage pétrolier de Treycovagnes a, quant à lui, rencontré du sel gemme et de l'anhydrite en grande quantité dans le Keuper (SHELL 1978). Si un fluide était présent dans ce type de roche, il devrait donc être une saumure de type Na-Cl et riche en sulfate, la solubilité du gypse étant fortement augmentée en raison de la force ionique très élevée d'une saumure Na-Cl. L'eau se trouvant dans les alluvions du Quaternaire de la plaine de l'Orbe ne joue pas de rôle dans le cas de notre recherche et n'a donc pas été étudiée. Des analyses de celle-ci se trouvent dans Petch (1970). Les caractéristiques des types d'eau rencontrés dans les aquifères de la Molasse au Keuper sont résumés dans le tableau 1.

6.3 Relation hydraulique entre la source thermale et le forage F4

Lors de l'exécution du forage F4 en 1981, le chimisme de son eau était proche de celui de la source thermale en dessus ($<350 \text{ m}$ de profondeur) et en dessous du Portlandien ($>400 \text{ m}$ de profondeur). Ce n'est que dans les couches mêmes du Portlandien que l'on retrouve une eau vraiment différente de celle de la source et similaire à celle d'Arkina (Vuataz et al. 1995;

Tab. 3. Analyses des eaux de la source haute du Cossaux, du forage La Grève-1, du forage F4 et de l'ancienne source thermale du Centre thermal. Les eaux du Cossaux et La Grève-1 représentent les deux composantes du mélange du Centre thermal s'écoulant dans l'aquifère du Malm. Les analyses des eaux La Grève-1 et Le Cossaux sont constituées de moyennes de 1 à 47 analyses suivant les paramètres. Le nombre d'analyses est indiqué entre parenthèses.

Echantillon	Forage La Grève-1	Source Le Cossaux	Source thermale	Source thermale	Forage F4	Forage F4
Dilution			faiblement diluée	fortement diluée	faiblement diluée	fortement diluée
Date échantillom	val. moyenne	val. moyenne	11.03.93	26.09.94	26.09.94	21.01.94
Température (°C)	31.5 ¹⁾	14.1 (47)	21.6	19.5	27.8	28.1
Conduct. (µS/cm)	335 (44)	402 (47)	487	408	398	384
pH	7.57 (44)	7.51 (47)	7.6	7.58	7.58	7.59
Eh (mV)	-122 (42)	356 (44)	-150	-117	-156	-104
TSD (mg/l)	337.6	387.8	442.8	388	379.6	367.7
Li (µg/l)	10 (5)	2.1 (7)	41	9	16	7
Na (mg/l)	7.5 (44)	1.6 (47)	44.6	13.3	14.1	6.9
K (mg/l)	2.25 (38)	0.64 (39)	1.9	1.1	1.1	1
Mg (mg/l)	22.1 (44)	16.1 (47)	20.4	20.5	23.1	22.8
Ca (mg/l)	39.7 (44)	70.9 (47)	40.6	55.1	48.7	50.9
Sr (mg/l)	1.8 (38)	0.37 (39)	1.4	1.14	1.03	0.8
Ba (µg/l)	33.6 (5)	14.7 (7)	42	27	26	25
Al (µg/l)	2.3 (5)	1.8 (4)	1.3	2.2	1.4	1.4
Rb (µg/l)	3.3 (5)	0.6 (7)	3.2	2	1.7	1.7
HCO ₃ (mg/l)	233 (44)	267.9 (47)	257.5	257.2	247.4	251.3
Cl (mg/l)	2.8 (44)	4 (47)	49	13.7	16.9	8.5
NO ₃ (mg/l)	<0.1 ()	6.9 (38)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
F (mg/l)	1.1 (8)	0.1 (9)	0.7	0.3	0.4	0.3
I (µg/l)	50 (5)	10 (7)	73	25	33	16
Br (µg/l)	12 (5)	5.5 (7)	45	15	11	13
SO ₄ (mg/l)	12.5 (37)	13.7 (39)	13.7	16.1	14.6	14.5
SiO ₂ (mg/l)	16.3 (38)	5.9 (39)	13	9.6	12.3	10.7
B (µg/l)	19 (5)	5.7 (6)	86	28	27	16
Tritium (UT)	<1 (8)	16 (10)	3.3	9	6.6	8.5
δ ² H (‰)	-74.3 (9)	-70.9 (11)	-77.1	-72.6	-74.1	-74.3
δ ¹⁸ O (‰)	-10.65 (9)	-10 (11)	-10.72	-10.32	-10.28	-10.23
δ ¹⁴ C (pcm)	<2.0 (3)	58.3 (3)	f25	35.8	20.7	
δ ¹³ C (‰)	-6.24 (3)	-11.2 (3)	-8.3	-9.4	-9.2	
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.707168 (1)	0.707322 (1)	0.707195 ²⁾		0.707212 ²⁾	
δ ³⁴ S SO ₄ (‰)	3.37 (2)	-2.4 (29)	3.25 ³⁾		0.11 ³⁾	
δ ¹⁸ O SO ₄ (‰)	9.9 (2)	3.5 (2)	5.3 ³⁾		6.64 ³⁾	

1) Température maximale mesurée en tête de puits

2) Analyses du 12.1.1993

3) Analyse du 7.10.1992

Muralt 1996). Depuis que le forage est en exploitation, les caractéristiques de la source ont changé: (1) les concentrations en chlorure et silice ainsi que la température ont baissé, et (2) la concentration en calcium a augmenté (fig. 6).

Le forage F4 et la source thermale montrent des variations saisonnières similaires de différents paramètres: débit/pression artésiens, teneurs en tritium, chlorure, silice, lithium, rubidium, baryum, etc. (fig. 7). La température et la conductivité électrique à la source thermale montrent une réaction rapide lorsque le forage F4 est mis en production pour remplir les réservoirs du Centre thermal. Quelques heures après le début du remplissage, température et conductivité dans la source diminuent, pour ne remonter que quelques heures après la fin du

remplissage. Ainsi le forage soutire de l'eau chaude et minéralisée à la source (fig. 8).

6.4 Arguments accréditant la présence d'un aquifère en-dessous du Malm

Les variations saisonnières de la composition chimique et isotopique des eaux du Centre thermal mettent en évidence des phénomènes de mélange (Vuataz 1982; Vuataz et al. 1995; Muralt 1996). Dans la source, ces variations sont plus prononcées que dans le forage, notamment parce qu'elle n'est pas directement influencée par des variations artificielles de sa production. De plus, il existe une variation saisonnière de la tempéra-

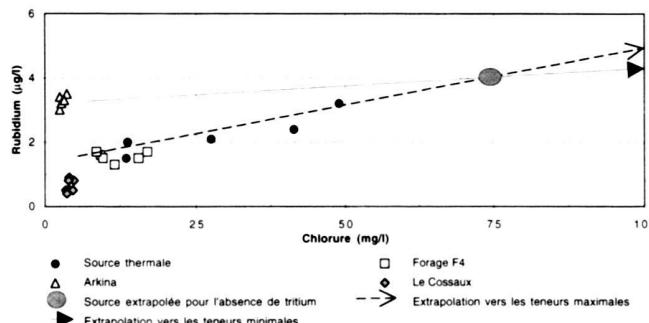


Fig. 9. Relation entre les teneurs en chlorure et en rubidium dans les eaux thermales et subthermales de la région d'Yverdon-les-Bains et tentative d'extrapolation de la composition du fluide profond avec le cas du rubidium (cf. texte pour la discussion des extrapolations).

ture de la source, variation qui ne peut pas être observée au forage à cause des effets de l'exploitation. Les plus grandes variations à la source et la relation directe existant entre source et forage (fig. 8) conduisent à étudier les phénomènes de mélange principalement à la source thermale.

Une composante récente (< 43 ans) est indiquée par la présence du tritium dans l'eau thermale. Le tritium est corrélé négativement avec la température et la minéralisation de l'eau (fig. 6). La composante récente est donc froide ou subthermale et peu minéralisée. Comme le forage F4 est tubé et cimenté sur toute sa hauteur au-dessus du Malm, cette eau récente doit circuler dans le Malm. Elle représente donc une eau typique des calcaires du Malm, pauvre en chlorure et de type Ca-HCO₃ (éventuellement Ca, Mg-HCO₃), similaire à l'eau de la source subthermale haute du Cossaux (tab. 3).

Le forage F4 produit son eau des couches du Malm. Comme l'apport en eau depuis la Molasse et le Crétacé est exclu en raison du tubage cimenté du forage, la majeure partie de l'eau chaude du forage F4 doit donc avoir l'empreinte chimique des roches carbonatées du Malm, comme s'est le cas pour la composante jeune, mais légèrement modifiée à cause de la température et du temps de séjour plus élevés. Les analyses des sources et forages qui produisent l'eau de l'aquifère du Malm (tab. 1; Petch 1970), démontrent que cette eau est pauvre en chlorure et de type Ca-HCO₃ ou Ca, Mg-HCO₃. Le forage La Grève-1 d'Arkina produit une eau représentative de la composante profonde et ancienne du Malm (tab. 3).

Dans la source thermale et le forage F4, les teneurs en chlorure et de quelques éléments traces (fluorure, iodure, lithium, baryum, etc.) sont élevées pour une eau issue uniquement des calcaires du Malm (tab. 1). De plus, ces éléments traces sont corrélés positivement avec le chlorure et la température (fig. 6). Seules les eaux des forages La Grève-1 (Malm) et Noréaz-1 (Crétacé) contiennent elles aussi des teneurs plus élevées en éléments traces, mais pratiquement pas de chlorure. Les eaux connues dans la Molasse contiennent trop de sulfate, alors que les eaux dans l'aquifère du Crétacé ne possè-

dent presque pas de chlorure ni de sulfate (tab. 1; Petch 1970). Il faut donc exclure l'hypothèse que les chlorures contenus dans l'eau thermale proviennent d'un mélange avec les eaux de la Molasse ou du Crétacé. Par contre, on peut admettre que les chlorures et certains éléments traces proviennent d'une eau plus chaude et plus profonde que l'aquifère du Malm.

Il est évident que le forage F4 et la source thermale produisent la même eau, mais mélangée différemment. Le fait que les eaux du forage F4 et de la source thermale ne s'alignent pas sur les mêmes droites de mélange mais définissent pour plusieurs paramètres des droites de corrélation subparallèles démontre l'existence d'un mélange entre trois composantes différentes au moins (fig. 6). On peut expliquer la présence des droites de mélange apparent à deux composantes observées sur la figure 6 en raison du chimisme propre aux trois composantes du mélange. En effet, les deux composantes froide et thermale du Malm sont faiblement minéralisées et possèdent une composition chimique très similaire entre elles contrairement à la composante plus profonde, plus chaude et relativement fortement minéralisée. Dans les diagrammes binaires elles se confondent donc à première vue et forment un pôle de mélange commun opposé à la composition chimique très différente de l'eau profonde. Le mélange à trois composantes n'est mis en évidence qu'à l'aide des analyses de la source thermale et du forage F4, grâce à des variations quantitatives du mélange pour chacun des deux points d'eau, surtout avec les paramètres nettement différenciés dans les deux composantes du Malm, tels que sodium, calcium, magnésium, silice et tritium (fig. 6).

6.5 Origine du fluide profond

Dans le but de prospection l'aquifère localisé en dessous du Malm, il est important de savoir, de quelle profondeur le fluide remonte. Le prochain aquifère potentiel situé en dessous du Malm est composé par les calcaires du Dogger (Bajocien), et se trouve à la profondeur d'environ 1000–1400 m sous le site du Centre thermal (fig. 2 et 3). Dans l'aquifère du Dogger on peut s'attendre à une eau d'une minéralisation plus élevée que l'eau actuellement exploitée, similaire à celle rencontrée dans le forage pétrolier de Hermrigen (tab. 1), c'est-à-dire de quelques grammes par litre au maximum et donc exploitable sans problèmes majeurs (Geister-Frantz 1987). Dans l'autre aquifère potentiel profond, celui du Keuper, il y a par contre une forte probabilité de rencontrer une saumure Na-Cl, et ce type d'eau ne serait pas exploitable à cause de sa minéralisation excessive.

Méthodologie

La teneur en chlorure, élément qui représente un traceur naturel pour le fluide profond, est étroitement liée à celle de différents éléments traces et de l'oxygène-18. D'autre part, l'excellente corrélation négative entre chlorure et tritium permet de calculer la teneur minimale en chlorure de l'eau dépourvue

Tab. 4. Extrapolation de la composition du fluide profond pour différentes teneurs en chlorure. Les valeurs négatives sont indiquées par «nég.».

Paramètre	Coefficient de corrélation avec le chlorure	Valeur maximale analysée (mg/l) ¹⁾	Valeurs extrapolées pour différentes concentrations en Cl ²⁾				
			Cl = 70 - 80 mg/l	Cl = 1'000 mg/l		Cl = 10'000 mg/l	
				minimum	maximum	minimum	maximum
Sodium (mg/l)	+0.97	48.1	70	890	940	8'900	9'400
Potassium (mg/l)	+0.94	1.9	2.3	3.8	21	18	210
Magnésium (mg/l)	-0.43	19.0 ¹	20	nég.	nég.	nég.	nég.
Calcium (mg/l)	-0.97	40.6 ¹	34	nég.	nég.	nég.	nég.
Strontium (mg/l)	+0.85	1.4	2.1	5.9	19	43	190
Sulfate (mg/l)	-0.77	8.8 ¹	10	nég.	nég.	nég.	nég.
Fluorure (mg/l)	+0.95	0.70	0.95	nég.	11	nég.	100
Lithium (mg/l)	+0.97	0.041	0.06	0.6	0.9	6	9
Baryum (mg/l)	+0.89	0.042	0.05	0.2	0.4	2	4
Rubidium (mg/l)	+0.91	0.0032	0.004	0.01	0.04	0.07	0.4
Iodure (mg/l)	+0.78	0.113	0.15	1.4	1.9	14	19
Bromure (mg/l)	+0.98	0.045	0.06	0.7	0.9	7	9
Bore (mg/l)	+0.98	0.086	0.12	1.4	1.6	14	16
Silice (mg/l)	+0.93	12.6	16	---	---	---	---
Température (°C)	+0.95	22.1	24	---	---	---	---
Oxygène-18 (‰)	-0.83	-10.97	-11	-16	-21	-65	-116

1) Magnésium, calcium et sulfate sont corrélés de manière négative avec le chlorure , par conséquent la valeur indiquée est la valeur minimale mesurée.

2) Les extrapolations à 1000 et 10'000 mg/l de chlorure doivent être essentiellement considérées comme des valeurs semi-quantitatives, en raison de l'absence de données pour les concentrations en chlorure supérieures à 50 mg/l.

de tritium, c'est-à-dire en faisant abstraction de la composante jeune (fig. 6). Cette teneur est d'environ 72 mg/l pour la source thermale, valeur qui est encore en-dessous de la concentration du fluide profond pur, car une analyse de Vuataz (1982) de la source, réalisée avant l'existence du forage F4, avait donné 85 mg/l de chlorure (analyse du 6.12.1977). La composition chimique indiquée par la corrélation entre chlorure et tritium est donc celle d'un pôle de mélange virtuel dans un système de mélange à trois composantes, dont les deux composantes thermales (Malm et fluide profond) ne possèdent pas de tritium. L'existence de ce pôle virtuel indique, qu'en l'absence de la composante jeune et tritiée, le mélange entre les deux composantes anciennes est relativement stable, et qu'il n'y a que peu de variations de la pression artésienne dans les différents aquifères. La teneur en chlorure de 70–80 mg/l pour la source représente donc une valeur minimale pour le fluide profond. De plus, elle permet de déterminer des teneurs minimales pour les autres espèces chimiques de l'eau qui sont liées au chlorure,

et d'extraire les concentrations des espèces chimiques pour des teneurs en chlorure supérieures à 70–80 mg/l (fig. 9). Dans ce but, certaines hypothèses doivent être évaluées.

- Les teneurs en éléments traces de l'eau d'Arkina représentent des valeurs maximales possibles pour la composante chaude du Malm au Centre thermal, parce que l'eau d'Arkina est elle aussi une eau ancienne et chaude du Malm, infiltrée dans la même région et sous des conditions climatiques semblables. De plus, elle ne se mélange pas avec des eaux jeunes (absence de tritium) mais avec l'eau ancienne de l'aquifère du Crétacé (Muralt 1996). Celle-ci est même plus riche en fluorure, lithium, iodure et bromure que l'eau du Malm.
- Sans la contribution du fluide profond, le mélange entre les deux composantes du Malm, respectivement l'eau subthermale récente de type Le Cossaux et l'eau thermale ancienne de type Arkina, possède une teneur en chlorure d'envi-

Tab. 5. Caractéristiques extrapolées du fluide profond de l'aquifère du Dogger.

Température	50–60 °C
Type chimique	Na-Cl; éventuellement Na-Cl, HCO ₃
Minéralisation totale	≤ 3–5 g/l ¹⁾
Teneur en chlorure	≤ 1 g/l
Teneurs en calcium, magnésium et sulfate	faibles
Teneur en H ₂ S	≥ 4 mg/l.

¹⁾ La valeur de 5 g/l est une interprétation par analogie avec l'eau du Dogger dans le forage de Hermringen (HOUSSÉ, 1982)

ron 3 mg/l. Pour mémoire, l'eau d'Arkina contient environ 2.8 mg/l et la composante profonde du Cossaux environ 4.0 mg/l (Muralt 1996).

- Les corrélations existant entre le chlorure et les différents composés chimiques ainsi que l'oxygène-18 sont significatives. Cette hypothèse est vérifiée par les excellents coefficients de corrélation (tab. 4) et le fait que tous ces coefficients sont significativement différents de 0 avec une probabilité de 97.5%, sauf pour le baryum et le iodure (Muralt 1996).

Basées sur ces hypothèses, les extrapolations minimales des composés chimiques et de l'oxygène-18 du fluide profond pour une certaine teneur en chlorure se trouvent sur une droite qui lie la composition chimique de l'eau Arkina (composante thermale ancienne de l'aquifère du Malm) avec les 70–80 mg/l de chlorure extrapolés précédemment (fig. 9). Par contre, les extrapolations maximales se trouvent sur la droite de corrélation entre le chlorure et l'espèce chimique concernée, sauf pour la silice, dont la concentration est contrôlée par une rééquilibration de la calcédoine à la température de 24°C, extrapolée pour la teneur en chlorure de 72 mg/l (Muralt 1996). Les valeurs minimales ainsi trouvées pour les différentes composantes de l'eau indiquent si le fluide profond pouvait être une saumure Na-Cl, ou si ces valeurs sont aberrantes. Evidemment, ce procédé d'extrapolation ne peut être qu'approximatif et la marge d'erreur augmente au fur et à mesure de l'extrapolation. Toutefois, ce procédé est le seul possible pour tenter de prévoir le chimisme du fluide profond. En effet, jusqu'à présent aucune eau plus profonde que celles des forages F4 et La Grève-1 ne sont connues dans la région d'Yverdon-les-Bains et par conséquent des calculs de mélange avec des fluides profonds existants ne peuvent donc être effectués. Les seuls fluides profonds rencontrés dans des conditions géologiques et structurales similaires à la région d'Yverdon-les-Bains sont ceux du forage pétrolier de Hermigen (Seeland). Toutefois, ce forage est éloigné de quelques 55 km d'Yverdon et on ne dispose d'aucune analyse isotopique ou d'éléments traces de ces fluides.

Estimation de la composition chimique du fluide profond

L'ensemble des teneurs extrapolées pour trois concentrations en chlorure différentes (70–80 mg/l, 1000 mg/l et 10 000 mg/l) sont présentées dans le tableau 4. Les résultats de ces calculs indiquent, pour le strontium et le fluorure, que les teneurs extrapolées sont invraisemblables pour une valeur en chlorure supérieure ou égale à 10 000 mg/l si le fluide profond est à l'équilibre avec la calcite, parce que la strontianite et la fluorine deviennent sursaturées. Si l'on admet que l'eau du Keuper est riche en sulfate, la barytine et la célestine deviennent sursaturées. Evidemment, afin d'interpréter ces résultats, on doit admettre des solubilités plus élevées pour ces minéraux, en prenant en considération la force ionique élevée d'un fluide fortement minéralisé. Ces extrapolations ne tiennent pas compte de réactions du type précipitation/dissolution en cas de mélange entre une saumure profonde et une eau faiblement minéralisée du Malm. Cependant, une éventuelle précipitation de minéraux tels que la barytine ou la célestine ne diminuerait pas de manière significative d'hypothétiques fortes teneurs en sulfate.

En raison de la présence importante d'anhydrite et de halite dans le Keuper du forage pétrolier de Treycovagnes à 4 km d'Yverdon-les-Bains (Shell, 1978), une eau issue du Keuper devrait obligatoirement être une saumure Na-Cl avec certainement plusieurs grammes de sulfate dissous. Or, le sulfate est corrélé négativement avec le chlorure et n'indique donc pas d'enrichissement dans le fluide profond.

Les valeurs d'oxygène-18 extrapolées (-16‰ à -21‰) pour une concentration en chlorure de 1000 mg/l, sont proches de celles que l'on peut admettre dans les conditions climatiques de la dernière glaciation. Bien que la corrélation entre le chlorure et l'oxygène-18 ne soit pas parfaite ($r = -0.83$), nous l'estimons comme assez fiable. En effet, elle repose sur les analyses de trois chercheurs, faites à des époques et dans des laboratoires différents (Vuataz 1982; Dubois & Flück 1985; Muralt 1996). De plus, la corrélation obtenue avec les trois analyses de Vuataz (1982) et de Dubois & Flück (1985) est quasiment identique à la corrélation faite avec les 12 analyses de Muralt (1996). Même en admettant une grande erreur sur l'extrapolation de l'oxygène-18, la corrélation négative significative entre le chlorure et l'oxygène-18 rend impossible le mélange avec une eau contenant plusieurs grammes de chlorure par litre.

De ces critères, on peut conclure que l'eau profonde n'est vraisemblablement pas une saumure Na-Cl et que la minéralisation totale de ce fluide ne devrait pas dépasser quelques grammes par litre au maximum. L'hypothèse la plus raisonnable de sa provenance est donc celle d'un aquifère dans les calcaires du Dogger.

6.6 Evaluation hydrochimique de l'aquifère du Dogger

D'après les analyses chimiques et les extrapolations réalisées, il semble vraisemblable, que l'eau de l'aquifère du Dogger est relativement pauvre en calcium et en magnésium, éléments

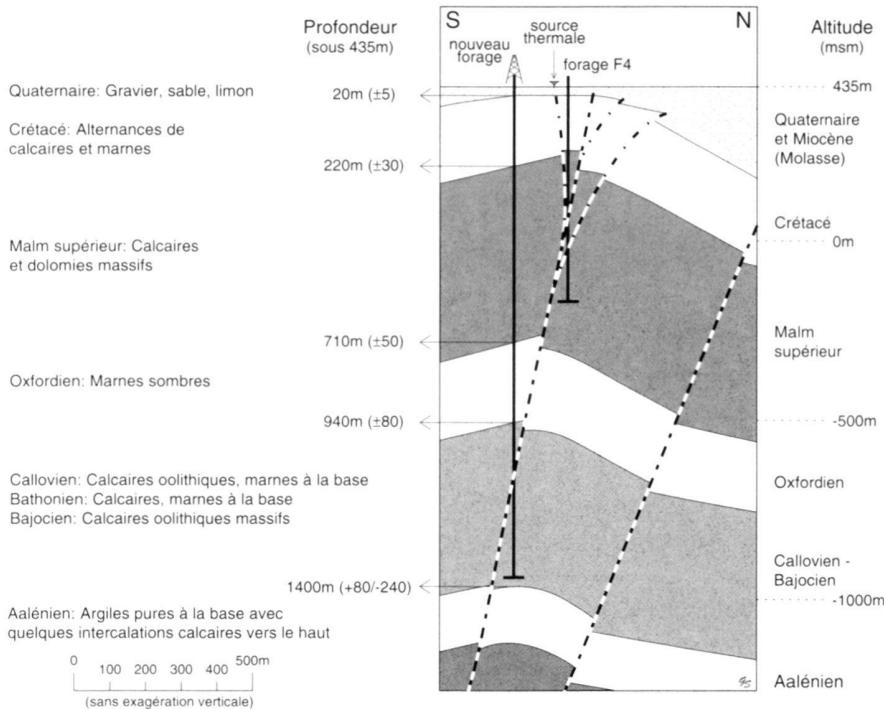


Fig. 10. Coupe géologique prévisionnelle d'un forage profond au Dogger sur le site du Centre thermal à Yverdon-les-Bains.

échangés avec le sodium par contact avec des argiles. Néanmoins elle doit être saturée par rapport à la calcite, avec laquelle elle est en contact dans l'aquifère. La relation molaire entre sodium et chlorure dans l'eau de la source thermale est d'environ 1.4, ce qui est expliqué par cet échange cationique. Les teneurs assez élevées en iodure et en bromure pourraient indiquer la présence d'une grande quantité de matière organique dans l'aquifère. On doit donc s'attendre à une eau fortement réductrice, contenant plus de H_2S que la source et le forage actuels, ce que confirme la corrélation positive existant entre chlorure et H_2S . Finalement, il faut noter que la décomposition de la matière organique pourrait engendrer la production de méthane, gaz qui représente 1.2% du volume des gaz dissous dans l'eau de la source thermale (Muralt 1996). Compte tenu de tous ces indices et déductions, on peut tenter de quantifier les caractéristiques probables du fluide profond (tab. 5).

7. Projet de forage profond au Dogger

7.1 Exploitation d'une nouvelle ressource

Actuellement, le Centre thermal d'Yverdon prélève du puits F4 un volume d'eau thermale de 3600 m³ par semaine, ce qui correspond à un débit artésien moyen de 20 m³/h. La température en tête de puits ne dépasse pas 29°C et l'eau thermale doit par conséquent être réchauffée à au moins 34°C, afin de pouvoir l'utiliser dans les piscines.

L'intérêt primordial d'une ressource d'eau thermale à plus grande profondeur est d'obtenir une température supérieure

ou égale à 35°C en tête de puits, pour économiser les frais de chauffage des piscines. Si la température est nettement au-dessus de 35°C, les excédents de calories pourront alors servir pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire et le chauffage des bâtiments. Le débit exploitable de cette nouvelle ressource devrait également atteindre 20 m³/h au moins. Il est vraisemblable que les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau dans l'aquifère du Dogger seront assez différentes de celles de l'eau du forage F4, ce qui demandera une adaptation des conditions d'exploitation du Centre thermal.

En cas d'exploitation continue d'un futur forage profond captant les eaux du Dogger, la source thermale et le forage F4 verront leur température et leur minéralisation diminuer quelque peu, respectivement 1 à 3°C et 5 à 10% environ. Il faut rappeler ici que la source thermale a déjà subi un tel phénomène lorsque le forage F4 a été mis en exploitation.

7.2 Caractéristiques prévisionnelles d'un forage profond au Dogger

Les coupes géologiques et le profil de sismique haute résolution réalisés montrent que la zone où se trouvent la source thermale et le forage F4 est précisément située au-dessus de la partie anticlinale de la faille PCC sud. Le site idéal de forage d'un puits au Dogger doit être le plus proche possible de cette faille, puisque c'est elle qui draine les eaux des différents aquifères et leur permet de remonter vers la surface (fig. 10).

Le sondage sera approfondi verticalement, en le laissant éventuellement dévier vers les zones de faiblesse, afin de suivre la faille PCC jusque dans le Dogger. Le passage dans le

Malm devra se faire rapidement, mais avec précaution, afin de ne pas perturber l'exploitation du puits actuel qui alimente le Centre thermal. Ensuite, cette zone devra être tubée et cimentée dès que possible, afin d'éviter les risques d'interaction lors de la suite du forage.

Le forage de 1400 m jusque dans les calcaires du Dogger, tel qu'il est conçu, ne devrait pas poser de problèmes techniques sérieux: il s'agit d'un forage vertical relativement standard, dans des formations géologiques connues.

8. Conclusions

8.1 Géologie et structure

De nombreuses données provenant des forages et des lignes sismiques sont disponibles dans la région d'Yverdon, mais il n'y a que peu d'informations concernant la zone de failles transpressives dextres Pipechat-Chamblon-Chevressy (PCC), dans laquelle le puits F4 du Centre thermal a été réalisé. L'interprétation et l'interpolation des anciennes lignes sismiques de qualité moyenne, localisées de part et d'autre du Centre thermal, ont permis de construire les coupes des figures 2, 3 et 8. Ces coupes montrent un pli à vergence nord en relation avec deux ou trois failles recoupant le flanc septentrional frontal. Les chevauchements s'enracinent dans le décollement principal localisé dans les couches du Trias. Plusieurs indices démontrent que ces failles tertiaires réactivent des structures anciennes, surtout des failles normales mésozoïques.

Le forage du Centre thermal suit apparemment la branche sud de la zone de faille PCC, avec un très fort pendage vers le sud. Cette zone fait vraisemblablement remonter l'eau par un réseau de fractures associées à la zone de faille. Un nouveau sondage profond devrait être positionné 100 à 200 m plus au sud, pour atteindre les couches du Dogger après la traversée de la faille sud (fig. 10). Si cette faille est inclinée moins fortement que prévu, le forage doit dévier vers le sud après la traversée de la faille afin de suivre la faille jusqu'aux couches rigides du Bathonien-Bajocien. Etant donné que le premier puits capte de l'eau thermale à quelques 100 m (ou moins) du plan de faille, il faudrait également réaliser le nouveau sondage à l'intérieur du mur et très près de la faille.

La construction des structures de la zone de faille le long des lignes sismiques est basée sur relativement peu de données. De plus, les structures à l'intérieur de zones de failles sont généralement sujettes à des changements rapides. Même si les lignes VD30 et SADH 8607 sont interprétées correctement, la géométrie sous le Centre thermal pourrait être différente de celle proposée. Par conséquent, la vérification du modèle en cours de forage est cruciale. Des pendages devront être mesurés très régulièrement tout au moins dans le Malm supérieur.

Une campagne de vibroseismic réalisée dans la zone urbaine d'Yverdon à proximité du Centre thermal a permis de reconnaître l'emplacement précis de l'axe anticlinal formé par la zone de faille PCC. De plus, des réflecteurs bien individualisés ont montré les épaisseurs et la structure des dépôts qua-

ternaires et de la Molasse immédiatement au nord et au sud de la zone de faille.

8.2 Hydrogéologie et hydrochimie

L'existence des circulations profondes d'eaux thermales à Yverdon-les-Bains est étroitement liée à la faille de PCC, et l'essentiel des écoulements souterrains profonds doit se produire parallèlement à cet accident tectonique. Yverdon-les-Bains, et plus spécialement le site du Centre thermal forment un exutoire régional des circulations profondes, incluant des eaux plus profondes que le Malm. Des valeurs de gradient géothermique ont été calculées pour les forages La Grève-1 (3.48°C/100 m) et F4 (3.73°C/100 m), qui semblent confirmer la remontée de fluides plus profonds que le Malm et le rôle de drain de la zone de faille PCC. De part et d'autre de cette faille, le site du Centre thermal et celui d'Arkina-La Grève-1 sont hydrauliquement bien séparés.

Les eaux de l'ancienne source thermale et du forage F4 du Centre thermal sont diluées et refroidies par une eau récente et peu profonde, mais incluent également une composante plus chaude et plus minéralisée qui a circulé dans un aquifère en-dessous du Malm. Par contre, ce fluide profond n'est pas observé dans l'eau du forage La Grève-1 Arkina, et c'est vraisemblablement l'accident tectonique PCC qui est responsable de la remontée de ce fluide. La composition chimique de cette composante profonde est caractérisée par des teneurs en chlorure, sodium, strontium, potassium et éléments traces supérieures à celles des eaux circulant uniquement dans l'aquifère du Malm. Il devrait aussi être riche en H₂S, mais plus pauvre en calcium et en oxygène-18. La minéralisation de ce fluide profond ne devrait pas dépasser quelques grammes par litre et serait probablement du type Na-Cl (HCO₃).

La provenance la plus probable de ce fluide profond sont les calcaires du Bajocien (Dogger moyen à inférieur), qui se trouvent à une profondeur d'environ 1200–1400 m sous le site du Centre thermal. Une origine à plus grande profondeur (Keuper) est très peu probable, en raison de la faible salinité extrapolée pour ce fluide profond. En fonction du gradient géothermique mesuré dans les forages, une température d'environ 50 à 60°C est attendue dans les couches du Bajocien.

Le risque existe, en cas d'exploitation d'un futur forage dans le Dogger, de voir la température et la minéralisation des fluides du forage F4 et de l'ancienne source thermale diminuer quelque peu. L'implantation d'un tel forage doit se situer à proximité de la faille PCC. Le forage devrait être approfondi jusqu'à 1400 m en s'approchant progressivement de la faille, dans le but d'atteindre une zone productrice dans les calcaires fissurés du Dogger.

Remerciements

La plupart des données et interprétations géologiques, structurales, hydrogéologiques et hydrochimiques livrées dans cet article proviennent pour une grande partie de projets du Fonds national suisse de la recherche scientifique (No 21-37366.93, No 21-32540.91 et No 20-39116.93).

D'autres études, notamment celle de géophysique (sismique haute résolution) ont été réalisées dans le cadre de mandats attribués par le Centre thermal d'Yverdon-les-Bains. Les auteurs remercient C. Ogay, directeur du Centre thermal, ainsi que son personnel technique, pour leur appui logistique et pour avoir fourni de nombreuses données.

Notre reconnaissance s'adresse aussi à A. Baud (Directeur du Musée de Géologie de Lausanne) et à Shell International (SIPM) pour avoir mis à disposition les résultats des forages pétroliers ainsi que les lignes de sismique réflexion. Nous témoignons également notre gratitude à M. Burkhard et H.A. Jordi de nous avoir consacré leur temps pour d'intéressantes discussions.

Finalement les auteurs tiennent à remercier les deux relecteurs, M. M. Mazurek de l'Université de Berne et M. H.P. Weiss de Gümligen de leurs commentaires pertinents, qui ont sensiblement contribué à améliorer cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- 1994: Carte géologique d'Yverdon-les-Bains. Atlas géologique Suisse, feuille No 94. Service hydrologique et géologique national.
- 1995: Notice explicative de la carte géologique d'Yverdon-les-Bains. Atlas géologique Suisse, feuille No 94. Service hydrologique et géologique national.
- KERN, A. 1982: Etude hydrogéologique et géochimique des sources du Chamblon et des autres sources thermales et minérales de la région d'Yverdon-les-Bains (Vaud). Travail de diplôme, Université de Genève, non publié.
- KIRALY, L. 1973: Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. Suppl. au Bull. Soc. neuch. Sci. nat., 96.
- LOOSER, M.O. 1990: Sources de Chamblon. Etude hydrogéologique pour la revalorisation des sources. Rapport pour les Services industriels d'Yverdon-les-Bains, non publié.
- MAUTNER, J. 1975–1978: Place d'armes du Chamblon. Relevés mensuels de la résistivité, du débit et de la température des sources du Mont de Chamblon. Rapport pour la Direction des constructions fédérales, non publié.
- MURALT, R. 1996: Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève, et Aix-les-Bains). Thèse de doctorat, Univ. de Neuchâtel.
- NAEF, A. & DIEBOLD, P. 1990: Interprétation de la sismique réflexion. Cédra informe 2, 16–28.
- PETCH, M. 1970: Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de l'Orbe. Matér. géol. Suisse, Géophys. 11.
- SCHARDT, H. 1910: Rapport géologique et hydrologique sur les sources du Mont de Chamblon, en particulier celles du Moulin Cosseau et leurs relations avec les eaux du marais de Baulmes. Rapport pour la Ville d'Yverdon-les-Bains, non publié.
- SCHNEEMANN, L., HÄRING, M.O. & RYSER, C. 1991: Schlussdokumentation über die Mineralwasserserschließung der Arkina SA, Yverdon-Les-Bains, von 1973 bis 1987. Rapport du Geologisches Institut Dr Schmassmann AG, non publié.
- SHELL 1978: SHELL Switzerland (Exploration). Operation for Jura Vaudois Pétrole SA. Final well report Treyvavagnes-1. By SIPM EP/11 and SHELL Française. The Hague, Dec. 1978.
- SOMMARUGA, A. 1996: Geology of the central Jura and the Molasse Basin: new insight into and evaporite-based foreland fold and thrust belt. Thèse de doctorat, Univ. de Neuchâtel.
- VUATAZ, F.D. 1982: Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. Matér. Géol. Suisse, Hydrol. 29.
- VUATAZ, F.D., MURALT, R., SCHÖNBORN, G., SOMMARUGA, A. & HINDLE, D. 1995: Etude hydrogéologique pour la réalisation d'un forage profond au Dogger à Yverdon-les-Bains. Rapport du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, non publié.
- ZAHNER, P., MAUTNER, J. & BADOUX, H. 1974: Etude hydrogéologique des sources thermominérales de Lavey, d'Yverdon et de Saxon. Mem. soc. vaud. Sci. nat. 95, 15, 209–256.

Manuscrit reçu le 21 mai 1996

Révision acceptée le 17 février 1997

