

DOCUMENT PUBLIC

INTERREG II
Caractéristiques hydrogéochimiques et
isotopiques de l'aquifère rhénan

Avril 1999
R 40596



DOCUMENT PUBLIC

INTERREG II
Caractéristiques hydrogéochimiques et
isotopiques de l'aquifère rhénan

W. Kloppmann

Mots clés : Aquifère rhénan, nappe d'Alsace, hydrogéochimie, géochimie isotopique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Kloppmann W. (1999) - INTERREG II Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan. Rap. BRGM R 40596, 107 p., 15 fig., 8 tab., 2 ann.

© BRGM, 1999, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La nappe alluviale du Rhin supérieur (France, Suisse et Allemagne) constitue l'un des plus importants réservoirs d'eau souterraine d'Europe exploité pour l'agriculture, l'industrie et pour l'AEP. Très sensible aux pollutions, cette nappe est largement contaminée dans sa partie amont, en particulier par les saumures minières, la rendant impropre à l'AEP le long de plusieurs langues salées entre Mulhouse et Colmar. Même avec la mise en place depuis 1987 de très importants travaux de dépollution (contrats MDP/AERM), il faudrait encore 100 ans pour nettoyer complètement la nappe de la salure infiltrée dans la seule zone française. A part les sources ponctuelles de pollution que constituent les terrils de résidus de sel, il faut faire face à une pollution diffuse liée en particulier à l'activité agricole entraînant une dégradation de la ressource en eau potable par introduction de fertilisants et de phytosanitaires.

L'étude hydrogéochimique et isotopique de l'aquifère alluvial rhénan à partir de la surface et jusqu'au substratum constitue un premier pas dans l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe vis-à-vis des pollutions. L'accent a été mis aussi bien sur la caractérisation du milieu hydrochimique naturel que sur l'impact anthropique et les traceurs chimiques et isotopiques ont été choisis en fonction de ces objectifs.

Les eaux de la nappe de l'aquifère rhénan ont été caractérisées sur le plan chimique et isotopique dans quatre secteurs entre Strasbourg et Fessenheim-Breisach, des deux cotés du Rhin. Au total, 13 forages profonds multi-crépines ou multi-tubes ont fourni 56 échantillons à des profondeurs différentes ; les résultats permettent d'établir un schéma de la répartition spatiale de la qualité des eaux et de tirer des conclusions sur leur temps de résidence.

1. Caractéristiques chimiques des eaux

Traceurs : éléments majeurs, paramètres physico-chimiques

Les eaux d'infiltration acquièrent dans le cas général, un caractère bicarbonaté-calcique dans la zone non saturée, et dans la zone peu profonde de la nappe. Trois principales déviations de ce faciès ont été observées, aussi bien dans la nappe superficielle que profonde :

- des eaux du type chloruré-sodique avec des concentrations parfois très élevées en chlorures et en sodium (jusqu'à 6,8 et 4,3 g/l respectivement). Ce caractère s'explique par des apports en NaCl d'origine diverses : dissolution naturelle d'évaporites dans le sous-sol, apports diffus d'origine anthropique (sels de déneigement), saumures en relation avec l'exploitation du sel dans le bassin potassique et mélange avec les eaux du Rhin. Une partie de ces eaux contient en effet une composante de filtrat de rive du Rhin aisément identifiable par ses teneurs isotopiques (voir point 2). D'autres se situent dans la zone susceptible d'être influencée par la salinité en provenance des terrils

de sel. Les traceurs spécifiques de l'origine de la salinité (point 3) permettent de mieux identifier les mécanismes de dissolution ou mélange.

- des eaux avec des teneurs en chlorures élevées qui montrent un déficit relatif en sodium et s'approchent donc d'un faciès chloruré-calcique. Des interactions avec les roches silicatées contenues dans les sables et graviers qui constituent l'aquifère peuvent expliquer ce déficit (néoformation d'argiles plus riches en Na, échanges cationiques).
- des eaux sulfatées-calciques avec des fortes teneurs en chlorures et en magnésium ont été identifiées localement. Les teneurs en sulfates sont liées à la dissolution de sulfates évaporitiques solides dans les formations qui forment l'encaissant et le substratum des alluvions.

2. Origine de l'eau

Traceurs : isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}O$, δ^2H)

L'analyse des isotopes stables de l'eau (isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène) permet d'identifier la provenance de l'eau, indépendamment de celle des espèces dissoutes. Deux groupes peuvent être distingués dans les eaux de la nappe. Le premier, relativement riche en isotopes lourds (^{18}O , deutérium), représente la recharge locale ou régionale. Le caractère isotopique est similaire à celui des eaux des sources et rivières en provenance des Vosges. Un échantillon d'eau de surface (de l'Ill à Hoenheim) se situe dans ce groupe. Un certain nombre de forages situés à proximité du Rhin produisent des eaux qui contiennent une composante de filtrat de rive. Ces eaux sont systématiquement appauvries en isotopes lourds ce qui traduit un effet d'altitude : l'élévation moyenne du bassin versant du Rhin étant supérieure à celle des bassins versants locaux, les eaux des précipitations sont, dès leur condensation, appauvries par rapport aux pluies qui tombent en plaine. Les isotopes stables de l'eau sont les seuls traceurs capables d'identifier les filtrats de rive sans ambiguïté dans la mesure où le caractère chimique de ces eaux est très variable.

Il est intéressant de noter que, dans certains cas, les filtrats de rive ont un temps de résidence prolongé dans la nappe. Les échantillons correspondants proviennent des profondeurs supérieures à 100 m, contiennent peu de tritium et montrent des "âges" radiocarbone élevés. On peut en conclure qu'il s'agit d'eaux anciennes du Rhin infiltrées en profondeur.

Dans aucun des forages étudiés, la combinaison des teneurs en isotopes stables de l'eau avec des indicateurs de temps de résidence (tritium et ^{14}C) ne permet de conclure sur une éventuelle contribution d'eaux d'âge pléistocène (> 10000 ans) qui auraient rechargé la nappe sous des conditions climatiques différentes des conditions actuelles.

3. Origine de la salinité

Traceurs : chlorures/bromures, isotopes du soufre et de l'oxygène dans les sulfates ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$), Isotopes du bore ($\delta^{11}\text{B}$)

Les eaux salines pour lesquelles la chlorinité est accompagnée de concentrations en sulfates élevées se distinguent clairement sur le plan isotopique : les teneurs isotopiques des sulfates dissous (isotopes du soufre et de l'oxygène) se situent dans le domaine des sulfates évaporitiques (gypse, anhydrite) qui, par leur dissolution, apportent la majeure partie des sulfates en phase aqueuse. Les eaux à plus faible concentration en sulfates se trouvent relativement appauvries en isotopes lourds (^{34}S , ^{18}O) le soufre proviendrait plutôt de sources atmosphériques, organiques ou sédimentaires (sulfures).

Les isotopes des sulfates ne montrent pas de signe de réduction des sulfates en sulfures, ce qui serait d'ailleurs incompatible avec le caractère généralement oxydant des eaux, même en profondeur. Ceci permet également de conclure sur un manque de potentiel de la nappe à réduire les nitrates.

Les halogénures Cl et Br ont un comportement conservatif dans la nappe et permettent de distinguer les deux principales origines potentielles de la salinité : la dissolution de NaCl évaporitique solide et la dilution de saumures primaires. Ces dernières, qui représentent des eaux marines fossiles piégées dans les sédiments (eaux connées) plus ou moins évaporées ou des saumures résiduelles accompagnant les évaporites se caractérisent par un rapport Cl/Br inférieur ou égal à l'eau de mer actuelle. Les eaux salines du secteur de Breisach montrent sans exception des rapports Cl/Br très élevés comparés au rapport marin, ce qui indique la dissolution de sels solides comme source des chlorures.

Les rapports isotopiques du bore se couvrent une gamme très large et les valeurs déterminées pour les eaux salines de Bremgarten se situent parmi les plus élevées rapportées dans la littérature. Les isotopes du bore constituent, en conséquence, un traceur potentiel très intéressant d'un certain type de contamination en chlorures probablement lié aux apports de sel ou de saumure. Il s'avère néanmoins indispensable de mieux caractériser les pôles de mélange potentiels sur le plan isotopique, notamment les sels solides des terrils, les saumures d'infiltration et les eaux non affectées par la salinisation.

3. Temps de résidence de l'eau dans la nappe, pénétration des polluants

Traceurs : nitrates, tritium (^3H), isotopes du carbone dissous et des sédiments : radiocarbone (^{14}C) et ^{13}C

La pénétration des nitrates et du tritium, qui constituent tous les deux des traceurs de l'impact humain sur la nappe, témoigne de la fragilité de la ressource vis-à-vis des pollutions en surface. Leurs sources principales sont respectivement les fertilisants et les essais thermonucléaires depuis les années 50. Les deux outils marquent donc des eaux jeunes avec des temps de résidence dans la nappe de quelques dizaines d'années. On observe une tendance générale de diminution des nitrates et du tritium dans la nappe avec la profondeur ; néanmoins deux constatations s'imposent :

- Aucune des eaux même prélevées à des profondeurs supérieures à 100 m n'est exempte de tritium, la concentration la moins élevée étant de 3UT (unités tritium). Cette observation reste valable pour des ouvrages pour lesquels on peut, *a priori*, exclure tout court-circuit hydraulique lié à l'aménagement des puits. Il apparaît donc que des eaux jeunes peuvent s'infiltrer rapidement jusqu'à des profondeurs proches de la base de l'aquifère.
- Les eaux profondes peuvent contenir des concentrations significatives en nitrates (jusqu'à 13 mg/l en dessous de 100 m). Les teneurs restent inférieures à la limite de potabilité mais le transfert rapide de polluants sur toute l'épaisseur de la nappe ne peut pas être exclu. On peut également conclure que la nappe profonde n'a généralement pas la capacité d'éliminer les nitrates par des processus naturels de réduction (dénitrification).

L'étude des teneurs isotopiques du carbone inorganique dissous et des carbonates solides qui constituent une partie de la matrice de l'aquifère permet de tirer des conclusions sur les interactions de l'eau infiltrante avec les gaz du sol et avec les carbonates. Les graviers calcaires montrent des teneurs isotopiques qui les caractérisent comme marins, indépendamment de leur état d'altération. Le ciment calcitique est marqué par l'influence de carbone organique en provenance du CO₂ du sol. Des encroûtements calcitiques rencontrés dans les nouveaux ouvrages du côté français ont précipités à partir d'une eau d'une composition isotopique semblable à la recharge actuelle à une température proche de 10°C. Le CO₂ impliqué dans les réactions de dissolution-précipitation a des teneurs isotopiques entre -20 et -25 ‰.

Ces observations permettent de mieux contraindre les paramètres d'entrée dans les modèles de "datation" par le radiocarbone. Nous avons utilisé deux modèles qui permettent de prendre en compte l'effet d'une dissolution en système ouvert et en système fermé vis-à-vis du CO₂ du sol.

Les teneurs en tritium montrent qu'aucune des eaux n'est dépourvue de toute composante jeune. Les "âges" ¹⁴C calculés constituent donc des âges mixtes que l'on peut considérer comme des âges minimaux d'une éventuelle composante ancienne. Dans plusieurs cas, les âges élevés d'eaux qui contiennent pourtant du tritium, montrent des mélanges entre eaux jeunes et anciennes. Les temps de résidence de l'ordre de plusieurs milliers d'années ont été calculés pour trois forages dans les secteurs de Strasbourg et de Breisach (Illkirch, Holtzheim et Heitersheim-Eschbach).

Zusammenfassung

Die Alluvionen des Oberrheingrabens stellen einen der bedeutendsten grenzübergreifenden Grundwasserleiter Europas dar. Die Grundwasservorräte werden intensiv genutzt, für landwirtschaftliche und industrielle Zwecke und zur Trinkwasserversorgung. In seinem stromaufwärts gelegenen Teil zwischen Mulhouse und Colmar ist der Grundwasserleiter von starker Versalzung betroffen, ausgelöst durch Versickerung von Salzlaugen des Kalibergbaus. Im Bereich der Kontaminationsfahnen sind die Grundwässer nicht mehr für die Trinkwasserversorgung nutzbar. Trotz großangelegter Dekontaminationsmaßnahmen wird eine vollständige Entsalzung des Grundwassers im französischen Teil des Aquifers die nächsten 100 Jahre in Anspruch nehmen. Neben dem punktförmigen Schadstoffeintrag durch Auswaschung der Kalisalzhalde müssen diffuse Einträge atmosphärischer und landwirtschaftlicher Schadstoffe wie Düngemittel und Pflanzenschutzmittel in Betracht gezogen werden. Die Abschätzung des Risikos einer Kontamination der tiefen Teile des Aquifers, für die *a priori* ein gewisser Schutz durch die mächtige Sedimentbedeckung angenommen werden könnte, verlangt:

- Kenntnis der Schadstoffverteilung mit der Tiefe über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters,
- Verfügbarkeit von spezifischen Tracern die über die Schadstoffquellen (insbesondere bezüglich der Versalzung) Aufschluß geben können,
- Untersuchung der natürlichen Abbaumechanismen von Schadstoffen im Aquifer,
- Kenntnis der Verweildauer des Grundwassers im Aquifer.

Die vorliegende hydrochemische und isopenchemische Studie der Rheinalluvionen stellt einen ersten Schritt auf dem Weg einer solchen Risikoabschätzung im französischen Abschnitt des Rheingrabens dar. Der Schwerpunkt liegt sowohl auf der Charakterisierung des unbeeinflussten hydrochemischen Milieus als auch auf dem Nachweis menschlicher Einflüsse und die chemischen und isopenchemischen Parameter wurden unter diesem Blickwinkel ausgewählt.

Die Grundwässer der Rheinalluvionen von der oberflächennahen Zone bis zu den tertiären und mesozoischen Basisschichten wurden in 4 Abschnitten des Rheingrabens von Straßburg bis Fessenheim-Breisach beiderseits des Rheins untersucht. Insgesamt wurden 56 Proben aus verschiedenen Tiefen in 13 Tiefbohrungen (mehrfach verfilterte Bohrungen und Mehrfachmeßstellen) entnommen, die Ergebnisse liefern ein erstes Bild der Tiefenverteilung der Grundwasserqualität und ermöglichen Rückschlüsse auf die Verweildauer des Grundwassers.

1. Chemische Charakterisierung der Grundwässer

Tracer: Hauptinhaltsstoffe, physicochemische Parameter

Die flachen Grundwässer zeichnen sich im Regelfall durch Vorherrschen von Erdalkalien und Hydrogencarbonat aus. Drei wesentliche Abweichungen von dieser Fazies konnten sowohl im flachen als auch im tiefen Teil der Alluvionen beobachtet werden :

- Natriumchloridwässer mit zum Teil sehr stark erhöhten Natrium- und Chloridkonzentrationen (bis zu 6,8 g/l an Na und 4,3 g/l an Cl). Dieser Grundwassertyp erklärt sich durch Eintrag von gelöstem NaCl aus verschiedenen potentiellen Quellen: Auflösung natürlicher Evaporitminerale, diffuse Einträge von der Oberfläche (Streusalz), Ablaugungswässer der Halden des Kalisalzbergbaus, und Mischung mit chloridischen Uferfiltratwässern des Rheins. Ein Teil der alkalischen Grundwässer weist in der Tat einen Uferfiltratanteil auf, der sich mit Hilfe der Sauerstoff- und Wasserstoffisotope identifizieren läßt (siehe Punkt 2). Andere Wässer des gleichen Typs stammen aus Bereichen des Aquifers für die eine Beeinflussung durch Kalisalzlaugen angenommen werden kann. Spurenstoffe und Isotopengehalte erlauben genauere Rückschlüsse auf die Ablaugungs- oder Mischungsvorgänge die für die hohen Salzgehalte verantwortlich sind.
- Chloridische Grundwässer mit einem Natriumdefizit. Das vorherrschende Kation ist Calcium, die entsprechenden Wässer weisen also Ca-Cl-Fazies auf. Austauschvorgänge mit silikatischen Bestandteilen der Rheinschotter und -sande können für die Erklärung des chemischen Charakters herangezogen werden (Neubildung Na-reicher Tonminerale, Kationenaustausch).
- Calciumsulfatwässer mit hohen Chlorid- und Magnesiumkonzentrationen konnten lokal nachgewiesen werden. Die Sulfatgehalte werden mit der Auflösung von Evaporiten in den tertiären und mesozoischen Basisschichten des quartären Grundwasserleiters in Verbindung gebracht.

2. Herkunft und Bildungsbedingungen der Grundwässer

Tracer: Stabile Isotope des Wassermoleküls (^{18}O , ^2H)

Die Analyse der stabilen Isotope des Wassermoleküls (Sauerstoff- und Wasserstoffisotope), erlaubt Aussagen über die Herkunft der Grundwässer, unabhängig von der Herkunft der gelösten Inhaltsstoffe. Die untersuchten Wässer lassen sich zwei Gruppen zuordnen. Die erste Gruppe weist höhere Gehalte an schweren Isotopen (^{18}O und Deuterium) auf und stammt aus lokaler oder regionaler Wiederergänzung. Der Isotopencharakter dieser Wässer ist vergleichbar mit Quellen und Oberflächenabfluß aus den Vogesen. Eine Probe von Oberflächenwasser aus der Ill bei Hoenheim liegt im gleichen Bereich des $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ - Diagramms.

Eine Anzahl von Bohrungen in Rheinnähe fördern Grundwässer mit einem überwiegenden Anteil von Uferfiltrat. Diese Wässer sind systematisch abgereichert an

schweren Isotopen was sich auf einen Höheneffekt zurückführen läßt: Die mittlere Höhenlage des Einzugsgebiets des Rheins liegt über der der lokalen Einzugsgebiete in Vogesen und Schwarzwald, die Niederschlagswässer sind, bedingt durch Isotopenfraktionierung bei der Kondensation, abgereichert gegenüber den Niederschlägen auf Mittelgebirge und Rheintal. Die stabilen O- und H-isotope sind die einzigen Tracer, die einen eindeutigen Nachweis von Uferfiltratanteilen ermöglichen, in Anbetracht des stark wechselnden chemischen Charakters der entsprechenden Wässer. In einigen Fällen läßt sich für überwiegend Uferfiltrat enthaltende Wässer eine erhöhte Verweildauer im Aquifer nachweisen. Die entsprechenden Proben stammen aus Tiefen über 100 m, enthalten nur wenig Tritium und weisen erhöhte Radiokarbonalter auf. Man kann also auf das Vorhandensein von "alten" Rheinwässern schließen, die bis zur Basis in die quartären Alluvionen eingedrungen sind.

In keinem der untersuchten Fälle kann man aus der Verbindung von ^{18}O - und ^2H -daten mit Tritium- und Radiokarbongehalten eindeutig auf die Wiederergänzung des Grundwasserleiters unter kälteren klimatischen Bedingungen, also auf die Existenz von fossilen Grundwässern pleistozänen Alters (>10000 Jahre) schließen.

3. Herkunft der Salzgehalte

Tracer: Chlorid/Bromidgehalte, Sauerstoff- und Schwefelisotope in den Sulfaten (^{34}S , ^{18}O) und Borisotope (^{10}B , ^{11}B)

Die salzhaltigen Wässer, deren hohe Chloridgehalte von hohen Sulfatkonzentrationen begleitet sind unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Isotopengehalte deutlich von den übrigen Grundwässern: Die Sauerstoff- und Schwefelisotopengehalte der Sulfate liegen im Bereich der Werte für Evaporitminerale (Gips, Anhydrit), die nach Auflösung den wesentlichen Anteil der gelösten Sulfate ausmachen. Die übrigen Grundwässer mit mittleren bis geringen Sulfatgehalten sind relativ abgereichert an ^{34}S und ^{18}O , der Schwefel stammt überwiegend aus Niederschlägen oder aus der Oxidation von organischem Material oder Sulfiden.

Die Isotopen des gelösten Sulfats zeigen keine Anzeichen von Sulfatreduktion. Die Grundwässer sind bis in hohe Tiefe oxidierend, mit Sauerstoffgehalten über 3 mg/l, die Bedingungen sind also weder für Sulfatreduktion noch für Denitrifizierung gegeben.

Die Halogene Chlor und Brom stellen konservative Tracer dar und ermöglichen die Unterscheidung zweier wesentlicher Ursachen für erhöhte Salzgehalte im Grundwasser, die Auflösung von Evaporiten (Steinsalz) und die Verdünnung primärer Salzlaugen. Letztere stellen fossiles Meerwasser (konnate Wässer) mit mehr oder minder hohem Eindampfungsgrad dar oder aber Restlaugen der Bildung von Salzlagern. Sie zeichnen sich durch Cl/Br-Verhältnisse aus, die dem von Meerwasser entsprechen oder darunter liegen. Die Salzwässer des Sektors von Breisach zeigen ohne Ausnahme sehr hohe Cl/Br-Verhältnisse, ein deutliches Anzeichen für Evaporitlösung als Hauptquelle der gelösten Salze.

Die Isotopenverhältnisse des gelösten Bors variieren sehr stark und die für die tiefe Meßstelle der Bohrung Bremgarten ermittelten Werte gehören zu den höchsten, die für natürliche Wässer beschrieben wurden. Die Borisotope stellen dementsprechend einen

potentiell sehr interessanten Tracer eines Typs von Versalzung dar, der mit größter Wahrscheinlichkeit mit Ablaugungswässern des Kalisalzbergbaus in Verbindung gebracht werden kann. Für weitergehende Interpretationen ist es unabdingbar, potentielle Mischungsendglieder isotopenchemisch zu charakterisieren, insbesondere die festen Salze der Kalisalzhalde, die Ablaugungswässer und die unbeeinflussten Grundwässer.

4. Verweildauer der Grundwässer, Tiefenverteilung der Nitrate.

Tracer: Nitrate, Tritium (^3H), Kohlenstoffisotope der Sedimente und Grundwässer (^{14}C , ^{13}C)

Die Nitratgehalte und die Tritiumkonzentrationen im Grundwasser sind wesentlich anthropogenen Ursprungs. Ihre Hauptquellen liegen in der Überdüngung landwirtschaftlicher Nutzflächen und, im Fall des Tritiums, in den oberirdischen Atombombentests der 50 bis 70 Jahre. Beide Tracer markieren demnach junge Grundwässer mit Verweildauern im Bereich einiger Jahrzehnte. Es läßt sich eine generelle Tendenz zur Verminderung der Tritium- und Nitratgehalte mit der Tiefe ausmachen doch müssen die folgenden Feststellungen für eine Beurteilung der Schutzfunktion der Aquifersedimente in Betracht gezogen werden:

- Es konnten, auch in Tiefen über 100 m und auch für Meßstellen, an denen Mestellendefekte mit größter Sicherheit ausgeschlossen werden können, keine tritiumfreien Grundwässer nachgewiesen werden. Es muß demnach angenommen werden, daß junge Grundwasserkomponenten relativ schnell bis zur Basis des quartären Aquifers vordringen können.
- Tiefe Grundwässer enthalten zum Teil signifikante Nitratkonzentrationen von bis zu 13 mg/l in 100 m Tiefe. Die Konzentrationen bleiben auch für die flachen Grundwässer unterhalb des Grenzwerts der Trinkwassernorm aber die Möglichkeit eines raschen Transports von Schadstoffen über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleites muß in Betracht gezogen werden. Es kann weiterhin davon ausgegangen werden, daß der Grundwasserleiter im untersuchten Teil des Rheingrabens im Allgemeinen nicht die Voraussetzungen für eine effiziente Denitrifizierung aufweist.

Die Untersuchung der Isotope des inorganischen gelösten Kohlenstoffs und der karbonatischen Bestandteile des Aquifermaterials erlaubt Rückschlüsse auf die Austauschprozesse der Wässer mit den Bodengasen und Karbonaten. Die kalkigen Anteile der Kiese zeigen die typischen Isotopengehalte mariner Karbonate unabhängig von ihrem Verwitterungszustand. Der kalzitische Zement ist demgegenüber abgereichert an ^{13}C , ein Zeichen der Beteiligung von CO_2 organischen Ursprungs. Kalkkrusten die in den neuen Bohrungen auf französischer Seite angetroffen wurden, wurden bei Temperaturen um 10°C aus infiltrierenden Wässern ausgefällt, die in ihrer Isotopenzusammensetzung den modernen lokalen Grundwässern entsprechen. Das beteiligte CO_2 weist, nach Modellrechnungen, $\delta^{13}\text{C}$ -werte zwischen -20 und -25 ‰ auf. Diese Ergebnisse ermöglichen eine bessere Eingrenzung der Eingabewerte für die Altersmodelle auf der Basis der Radiokarbonegehalte. Zwei Modelle wurden ausgewählt,

die es ermöglichen, Karbonatlösung im offenen oder geschlossenen System in Bezug auf die Gasphase zu berücksichtigen.

Die Tritiumgehalte zeigen für alle betrachteten Grundwässer eine Jungwasserkomponente an. Die berechneten ^{14}C -Alter stellen also Mischalter dar und können als Minimalalter der beteiligten "alten" Komponente aufgefasst werden. In mehreren Fällen zeigen die tritiumhaltigen Wässer Modellalter von mehreren tausend Jahren, ein Indiz für Mischungsvorgänge von alten und rezenten Wässern im tiefen Aquiferbereich. Die höchsten Modellalter von 2000-7000 Jahren wurden für die tiefen Niveaus von drei Bohrungen im Raum Straßburg und Breisach ermittelt (Illkirch, Holtzheim und Heitersheim-Eschbach).

Sommaire

7

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 17 |
| 1. Cadre géologique et hydrogéologique, caractéristiques des forages..... | 19 |
| 2. Travaux effectués et résultats..... | 25 |
| 2.1. Diagraphies | 25 |
| 2.2. Prélèvements et analyses sur site | 26 |
| 2.2.1. Prélèvements | 26 |
| 2.2.2. Mesures réalisées sur le terrain | 27 |
| 2.3. Résultats chimiques et isotopiques | 30 |
| 2.3.1. Programme d'analyses | 30 |
| 2.3.2. Analyses chimiques des eaux..... | 31 |
| 2.3.3. Analyses isotopiques..... | 35 |
| 3. Discussion des résultats..... | 39 |
| 3.1. Caractère chimique des eaux..... | 39 |
| 3.2. Origine de l'eau : isotopes stables ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$)..... | 42 |
| 3.3. Origine des espèces dissoutes | 45 |
| 3.3.1. Origine du carbone inorganique dissous dans les eaux et les carbonates ... | 45 |
| 3.3.2. Origine de la salinité | 49 |
| 3.3.3. Origine des sulfates dissous : isotopes du soufre et de l'oxygène ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$) | 57 |
| 3.3.4. Pénétration des nitrates dans la nappe..... | 60 |
| 3.3.5. Pollutions par des contaminants organiques | 62 |
| 3.4. Temps de résidence de l'eau..... | 63 |
| 3.4.1. Teneurs en tritium | 63 |
| 3.4.2. Estimation des temps de résidence sur la base de l'activité en ^{14}C | 66 |
| Conclusion | 71 |
| Bibliographie..... | 75 |

Liste des figures

- Fig. 1 - Carte hydrogéologique simplifiée du Fossé rhénan avec situation des points de prélèvement
- Fig. 2 - Diagramme de Piper montrant le faciès chimique des eaux de l'aquifère rhénan dans les secteurs étudiés
- Fig. 3 - Diagramme $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (isotopes stables de l'eau). Eaux des secteurs étudiés, eau de l'III à Hoenheim, comparaison avec les eaux des sources et eaux superficielles régionales (Garcia, 1986)
- Fig. 4 - Teneurs isotopiques de carbonates issus des forages de Niederhergheim et de Balgen-Naubsheim : galets de calcaires, ciment calcitique, néoformations de calcite (encroûtement calcaire dans le forage de Niederhergheim). Les courbes représentent la composition isotopique théorique des calcites précipitées en équilibre avec une eau à $\delta^{18}\text{O}$ entre -9,5 et -8,5 ‰ vs. SMOW à différentes températures qui aurait préalablement dissous un CO_2 du sol de 22,2 ‰ vs. PDB
- Fig. 5 - $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous vs. pH. L'évolution isotopique par dissolution congruente d'une phase carbonatée a été modélisée (voir Kloppmann *et al.*, 1998) pour les cas d'un système ouvert et fermé vis-à-vis du CO_2 du sol. Les paramètres suivants ont été utilisés : $T = 10^\circ\text{C}$, $p\text{CO}_2 = 10^{-1.5}$ atm, $\delta^{13}\text{C}$ de la phase gazeuse entre -25‰ et -19‰ vs. PDB, $\delta^{13}\text{C}$ de la phase solide = +2,2 ‰
- Fig. 6 - Répartition des teneurs en chlorures avec la profondeur dans les secteurs étudiés de l'aquifère rhénan
- Fig. 7 - Teneurs en Cl vs. Br pour les forages du secteur Breisach
- Fig. 8 - $\delta^{11}\text{B}$ vs. Cl pour les forages du secteur Breisach. Des hyperboles de mélange ont été calculées pour les différents niveaux de Heitersheim-Eschbach et de Bremgarten
- Fig. 9 - Situation des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ de Heitersheim-Eschbach et Bremgarten (niveau profond) par rapport aux sels et saumures résiduelles issues de l'évaporation de l'eau de mer (Vegosh *et al.*, 1992)
- Fig. 10- Répartition des teneurs en sulfates avec la profondeur dans les secteurs étudiés de l'aquifère rhénan

- Fig. 11 - Digramme $\delta^{34}\text{S}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (isotopes stables des sulfates dissous) pour les eaux de l'aquifère rhénan
- Fig. 12 - Répartition des teneurs en nitrates avec la profondeur dans le secteur de Strasbourg
- Fig. 13 - Répartition des teneurs en tritium avec la profondeur
- Fig. 14 - Diagramme teneurs en ^3H et en Nitrates en fonction de la profondeur. Eaux de l'aquifère rhénan dans le secteur de Strasbourg
- Fig. 15 - Diagramme activité ^{14}C versus $\delta^{13}\text{C}$ (isotopes du carbone inorganique dissous) pour les eaux de l'aquifère rhénan

Liste des tableaux

- Tab. 1 - Caractéristiques des forages
- Tab. 2 - Résultats d'analyses : Paramètres physico-chimiques
- Tab. 3 - Techniques d'analyses et précision sur les mesures (BRGM)
- Tab. 4 - Résultats d'analyses (secteur de Strasbourg) : Carbone organique dissous, Triazines et COV
- Tab. 5 - Résultats d'analyses : Eléments majeurs et traces
- Tab. 6 - Résultats d'analyses : Isotopes stables et radioactif de l'eau, isotopes du carbone inorganique dissous, isotopes stables des sulfates dissoutes, isotopes du bore
- Tab. 7 - Résultats d'analyses : Isotopes stables du carbone et de l'oxygène dans les constituants carbonatés des graviers et dans les ciments calcitiques (forages de Niederhergheim et Balgau-Nambsheim)
- Tab. 8 - Estimation du temps de résidence de l'eau dans l'aquifère sur la base des analyses ^3H et ^{14}C

Introduction

La nappe alluviale du Rhin supérieur (France, Suisse et Allemagne) constitue l'un des plus importants réservoirs d'eau souterraine d'Europe exploité pour l'agriculture, l'industrie et pour l'AEP. Très sensible aux pollutions, cette nappe est largement contaminée dans sa partie amont, en particulier par les saumures minières, la rendant impropre à l'AEP le long de plusieurs langues salées entre Mulhouse et Colmar. Même avec la mise en place depuis 1987 de très importants travaux de dépollution (contrats MDP/AERM), il faudrait encore 100 ans pour nettoyer complètement la nappe de la salure infiltrée dans la seule zone française. A part les sources ponctuelles de pollution que constituent les terrils de résidus de sel, il faut faire face à une pollution diffuse liée en particulier à l'activité agricole entraînant une dégradation de la ressource en eau potable par introduction de fertilisants et de phytosanitaires.

Dans le but d'une évaluation des risques de pollution des parties de l'aquifère réputées "protégées" par une épaisseur importante de sédiments alluviaux, il est indispensable de :

- connaître le degré de pénétration des polluants dans la nappe profonde ;
- de disposer de traceurs susceptibles d'identifier l'origine des polluants en particulier de la salinité, afin de :
 - ◊ distinguer les entrées naturelles et anthropiques dans la nappe ;
 - ◊ distinguer l'origine profonde et superficielle pour certaines espèces ;
 - ◊ quantifier l'interaction des eaux avec l'encaissant et l'impact de ces interactions sur la qualité de la ressource .
- d'évaluer le potentiel d'auto-épuration de la nappe, les particularités du milieu chimique qui favoriseraient une dégradation des polluants (exemple : dénitrification);
- de mieux contraindre les temps de transfert vers la nappe profonde. Estimer le temps de résidence des eaux de façon qualitative et quantitative au moyen de traceurs chimiques et isotopiques permettra d'évaluer directement la vulnérabilité de la nappe face à des pollutions potentielles et de fournir des éléments supplémentaires aux modélisations et simulations hydrodynamiques.

L'étude hydrogéochimique et isotopique de la nappe à partir de la surface et jusqu'au substratum constitue un premier pas dans cette évaluation. L'accent a été mis aussi bien sur la caractérisation du milieu hydrochimique naturel que sur l'impact anthropique et les traceurs chimiques et isotopiques ont été choisis en fonction de ces objectifs.

La présente étude s'inscrit dans le cadre de l'initiative communautaire INTERREG II. Le BRGM s'est engagé à participer au projet d'inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur à travers une contribution de la Direction de la Recherche à des études chimiques et isotopiques des eaux à différentes profondeurs dans la nappe.

Les eaux de la nappe de l'aquifère rhénan ont été caractérisées sur le plan chimique et isotopique dans quatre secteurs entre Strasbourg et Fessenheim-Breisach, des deux cotés du Rhin. Au total, 13 forages profonds multi-crépinés ou multi-tubes ont fourni 56 échantillons à des profondeurs différentes ; les résultats permettent d'établir un schéma de la répartition spatiale de la qualité des eaux et de tirer des conclusions sur leur temps de résidence.

1. Cadre géologique et hydrogéologique, caractéristiques des forages

D'un point de vue géologique (Noyer *et al.*, 1998), les alluvions grossières de la plaine rhénane ont été déposées au quaternaire par le Rhin, apportant du matériel clastique d'origine alpine, et ses affluents qui érodaient les Vosges et la Forêt-Noire. Les alternances climatiques glaciaires et interglaciaires ont engendré des épisodes de transport de haute énergie entrecoupés de périodes plus calmes, où coexistaient terrasses exondées recouvertes de sédiments loessiques et zones de sédimentation clastique fine argilo-silto-sableuse. La structure des alluvions est donc très complexe ; les dépôts clastiques fins intercalés dans les alluvions grossières sont lenticulaires et entrecoupés de chenaux plus grossiers, et leur corrélation est donc assez aléatoire.

Cependant au Bade-Wurtemberg on distingue traditionnellement trois sous-niveaux hydrogéologiques dans les alluvions rhénanes, d'après les observations faites au nord de Karlsruhe, où les intercalations fines ont des épaisseurs et des continuités beaucoup plus importantes qu'en Alsace. Ils distinguent ainsi des alluvions supérieures *oberes Kieslager* (OKL), des alluvions moyennes : *mittleres Kieslager* (MKL) et des alluvions inférieures : *unteres Kieslager* (UKL), séparées par des intercalaires silteux (*oberer Zwischenhorizont* (OZH) et *unterer Zwischenhorizont* (UZH) respectivement) (Elsass et Rau, 1995). Ces vues sont aujourd'hui contestées, les datations ayant montré la difficulté de corréler entre eux les intercalaires clastiques fins rencontrés dans les forages.

Sur les flancs des Vosges et de la Forêt-Noire, les cônes de déjection des alluvions en provenance des massifs peuvent être subdivisés en deux séquences, une ancienne plus altérée et de plus faible perméabilité, et une récente moins altérée et plus perméable. Côté allemand, le contraste de perméabilité est tel que l'on n'a pas jugé utile de compter la séquence ancienne dans l'aquifère. Côté alsacien, le contraste est moins important, ce qui explique que cette distinction n'ait jamais été faite très clairement.

Le milieu de la plaine d'Alsace est occupé par des alluvions rhénanes à prédominance alpine, que l'on peut grossièrement subdiviser en trois sous-niveaux d'alluvions de plus en plus altérés et de moins en moins perméables en profondeur.

Quatre secteurs de la plaine alluviale du Rhin supérieur ont été choisis en fonction de la disponibilité de forages profonds permettant d'accéder à des eaux sur toute la profondeur de la nappe et prenant en compte des problèmes spécifiques de contamination locale et régionale. La figure 1 montre la localisation des ouvrages et le tableau 1 donne leurs caractéristiques principales. Des coupes géologiques et techniques détaillées sont données en annexe.

1. Secteur Strasbourg

Il s'agit de 4 forages multi-crépinés destinés à la recherche de nouvelles ressources d'eau potable pour la communauté urbaine de Strasbourg (communes de Holtzheim, Wolfisheim, Hoenheim, Illkirch).

Le cinquième forage (commune de Pfulgiesheim) est un forage AEP exploité.

2. Secteur Benfeld

Suite à la détection d'une pollution en solvants organo-chlorés volatils sur la commune d'Erstein, le Conseil régional d'Alsace a décidé d'engager une étude relative au suivi de l'évolution de cette pollution aux environs de la commune de Benfeld. Dans ce cadre, l'implantation de trois piézomètres profonds multi-crépinés à Benfeld, Erstein et Sand a été confié à la société de forage SADE.

3. Secteur Breisach-Fessenheim

En raison de la salinisation croissante de la nappe alluviale en amont de la ville de Freiburg, des piézomètres multi-tubes ont été installés afin de suivre l'évolution de cette pollution. Les ouvrages étudiés se trouvent à Heitersheim-Eschbach (2 niveaux analysés) et à Bremgarten (2 niveaux analysés). Les résultats sont comparés au niveau profond du forage de Breisach (TP1). Un piézomètre profond multitube de 110 m a été installé du côté français à Balgau pour compléter ce réseau.

4. Secteur Niederhergheim-Hettenschlag

Un piézomètre profond multi-tube a été réalisé dans le cadre de l'inventaire transfrontalier de la qualité des eaux souterraines de la Vallée du Rhin en 1998 à Niederhergheim dans le but d'étudier la salinisation de la nappe alluviale sur le côté français à l'aval du bassin potassique. Le forage atteint 144 m et est équipés de 4 tubes crépinés.

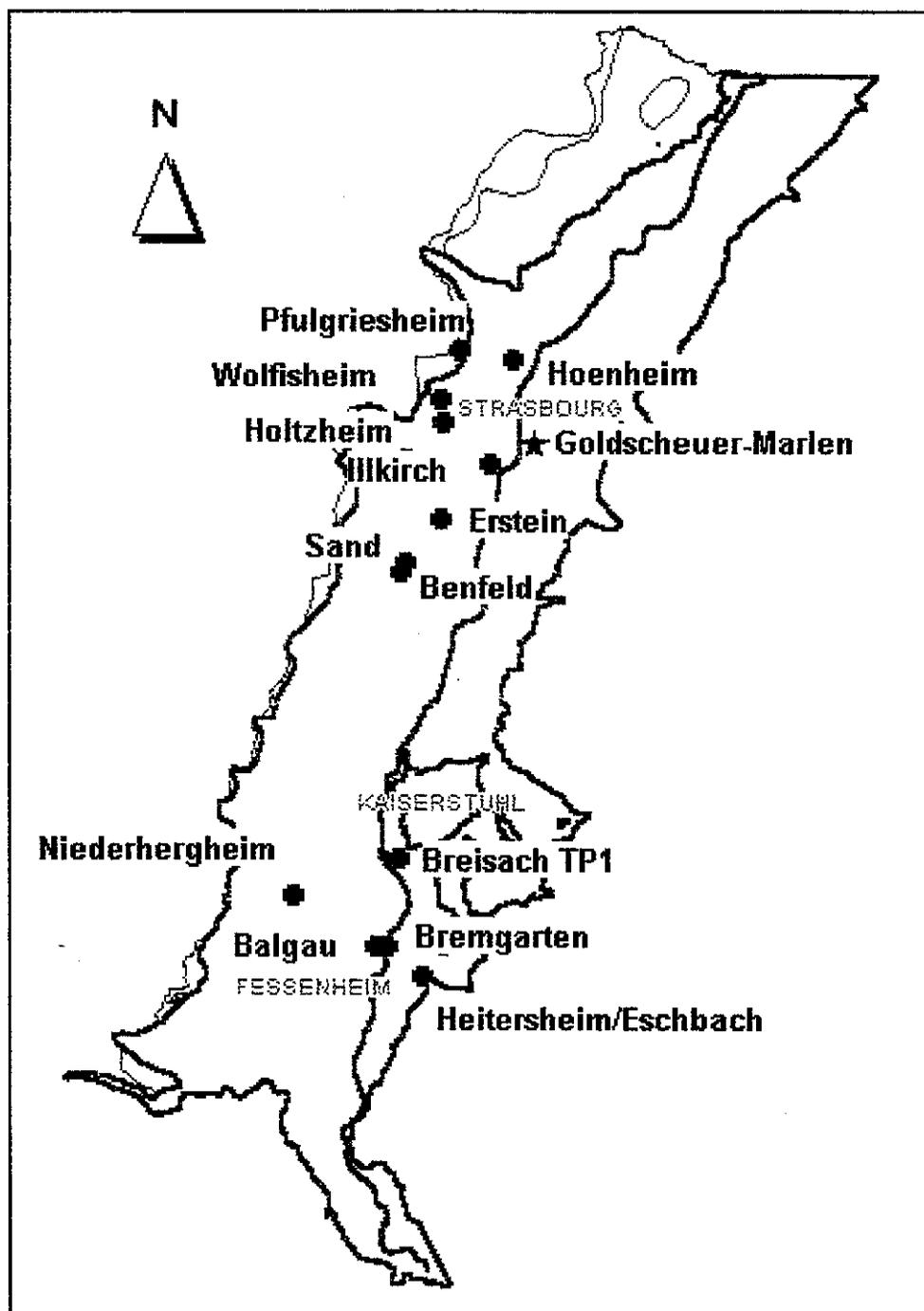


Fig. 1 - Carte hydrogéologique simplifiée du Fossé rhénan avec situation des points de prélèvement.

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

| forage | N° BSS/LU | X Lambert 2 Et/ Rechtswert | Y Lambert 2 Et/ Hochwert | Z (m) | label | prof. crep. deb. | prof. crep. fin | prof. moy. | long. interv. crep. |
|----------------------|--------------|----------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------------|-----------------------|---------------|---------------------------|
| HOLTZHEIM | | | | | | | | | |
| HOLTZ 56,15 | 0272-2X-0513 | 993,15 | 108,7 | 149 | HO4 | 54,9 | 57,4 | 56,15 | 1,25 |
| HOLTZ 47,75 | 0272-2X-0513 | 993,15 | 108,7 | 149 | HO3 | 47 | 48,5 | 47,75 | 0,75 |
| HOLTZ 31,1 | 0272-2X-0513 | 993,15 | 108,7 | 149 | HO2 | 30,2 | 32 | 31,1 | 0,9 |
| HOLTZ 14,25 | 0272-2X-0513 | 993,15 | 108,7 | 149 | HO1 | 13,5 | 15 | 14,25 | 0,75 |
| WOLFISHEIM | | | | | | | | | |
| WOLF 46,2 | 0272-2X-0543 | 992,55 | 111,57 | 144 | WO3 | 45,4 | 47 | 46,2 | 0,8 |
| WOLF 32,2 | 0272-2X-0543 | 992,55 | 111,57 | 144 | WO2 | 31,4 | 33 | 32,2 | 0,8 |
| WOLF 15,25 | 0272-2X-0543 | 992,55 | 111,57 | 144 | WO1 | 14,5 | 16 | 15,25 | 0,75 |
| HOENHEIM | | | | | | | | | |
| HOEN 114,25 | 0234-7X-0362 | 1001,61 | 117,71 | 135 | HN7 | 113 | 115,5 | 114,25 | 1,25 |
| HOEN 91,75 | 0234-7X-0363 | 1001,61 | 117,71 | 135 | HN6 | 91 | 92,5 | 91,75 | 0,75 |
| HOEN 74,75 | 0234-7X-0364 | 1001,61 | 117,71 | 135 | HN5 | 74 | 75,5 | 74,75 | 0,75 |
| HOEN 61,25 | 0234-7X-0365 | 1001,61 | 117,71 | 135 | HN4 | 60,5 | 62 | 61,25 | 0,75 |
| HOEN 46,25 | 0234-7X-0366 | 1001,61 | 117,71 | 135 | HN3 | 45,5 | 47 | 46,25 | 0,75 |
| HOEN 31,25 | 0234-7X-0367 | 1001,61 | 117,71 | 135 | HN2 | 30,5 | 32 | 31,25 | 0,75 |
| HOEN 14,75 | 0234-7X-0368 | 1001,61 | 117,71 | 135 | HN1 | 14 | 15,5 | 14,75 | 0,75 |
| ILL 0 | | | | | | | | 0 | |
| ILLKIRCH | | | | | | | | | |
| ILLK 145,75 | 0272-7X-0078 | 999,89 | 103,75 | 143 | IL8 | 145 | 146,5 | 145,75 | 0,75 |
| ILLK 116,25 | 0272-7X-0078 | 999,89 | 103,75 | 143 | IL7 | 115,5 | 117 | 116,25 | 0,75 |
| ILLK 104,75 | 0272-7X-0078 | 999,89 | 103,75 | 143 | IL6 | 104 | 105,5 | 104,75 | 0,75 |
| ILLK 91,25 | 0272-7X-0078 | 999,89 | 103,75 | 143 | IL5 | 90,5 | 92 | 91,25 | 0,75 |
| ILLK 76,75 | 0272-7X-0078 | 999,89 | 103,75 | 143 | IL4 | 76 | 77,5 | 76,75 | 0,75 |
| ILLK 61,3 | 0272-7X-0078 | 999,89 | 103,75 | 143 | IL3 | 60,5 | 62,1 | 61,3 | 0,8 |
| ILLK 44,75 | 0272-7X-0078 | 999,89 | 103,75 | 143 | IL2 | 44 | 45,5 | 44,75 | 0,75 |
| ILLK 13,8 | 0272-7X-0078 | 999,89 | 103,75 | 143 | IL1 | 13,1 | 14,5 | 13,8 | 0,7 |
| PFULGRIESHEIM | | | | | | | | | |
| PFUL 54 | 0234-6X-0185 | 994,726 | 2418,099 | 158 | PF1 | 80 | 28 | 54 | -26 |
| PFUL | 0234-6X-0185 | 994,726 | 2418,099 | 158 | PFg | global | | | |
| BENFELD | | | | | | | | | |
| BENFELD 82,26 | 0308-1X-0155 | 989,424 | 2387,981 | | BE8 | 79,76 | 84,76 | 82,26 | 2,5 |
| BENFELD 66,76 | 0308-1X-0155 | 989,424 | 2387,981 | | BE7 | 64,26 | 69,26 | 66,76 | 2,5 |
| BENFELD 54,76 | 0308-1X-0155 | 989,424 | 2387,981 | | BE6 | 52,26 | 57,26 | 54,76 | 2,5 |
| BENFELD 42,76 | 0308-1X-0155 | 989,424 | 2387,981 | | BE5 | 40,26 | 45,26 | 42,76 | 2,5 |
| BENFELD 30,76 | 0308-1X-0155 | 989,424 | 2387,981 | | BE4 | 28,26 | 33,26 | 30,76 | 2,5 |
| BENFELD 18,76 | 0308-1X-0155 | 989,424 | 2387,981 | | BE3 | 16,26 | 21,26 | 18,76 | 2,5 |
| BENFELD 10,26 | 0308-1X-0155 | 989,424 | 2387,981 | | BE2 | 7,76 | 12,76 | 10,26 | 2,5 |
| BENFELD 4,26 | 0308-1X-0155 | 989,424 | 2387,981 | | BE1 | 1,76 | 6,76 | 4,26 | 2,5 |
| SAND | | | | | | | | | |
| SAND 77,41 | 0308-1X-0156 | 990,078 | 2389,304 | | SA7 | 74,91 | 79,91 | 77,41 | 2,5 |
| SAND 65,41 | 0308-1X-0156 | 990,078 | 2389,304 | | SA6 | 62,91 | 67,91 | 65,41 | 2,5 |
| SAND 53,41 | 0308-1X-0156 | 990,078 | 2389,304 | | SA5 | 50,91 | 55,91 | 53,41 | 2,5 |
| SAND 41,41 | 0308-1X-0156 | 990,078 | 2389,304 | | SA4 | 38,91 | 43,91 | 41,41 | 2,5 |
| SAND 29,41 | 0308-1X-0156 | 990,078 | 2389,304 | | SA3 | 26,91 | 31,91 | 29,41 | 2,5 |
| SAND 17,41 | 0308-1X-0156 | 990,078 | 2389,304 | | SA2 | 14,91 | 19,91 | 17,41 | 2,5 |
| SAND 5,41 | 0308-1X-0156 | 990,078 | 2389,304 | | SA1 | 2,91 | 7,91 | 5,41 | 2,5 |
| ERSTEIN | | | | | | | | | |
| ERSTEIN 74,96 | 0272-6X-0276 | 994,122 | 2395,543 | | ER8 | 72,21 | 77,71 | 74,96 | 2,75 |
| ERSTEIN 66,71 | 0272-6X-0276 | 994,122 | 2395,543 | | ER7 | 64,21 | 69,21 | 66,71 | 2,5 |
| ERSTEIN 54,71 | 0272-6X-0276 | 994,122 | 2395,543 | | ER6 | 52,21 | 57,21 | 54,71 | 2,5 |
| ERSTEIN 45,21 | 0272-6X-0276 | 994,122 | 2395,543 | | ER5 | 42,71 | 47,71 | 45,21 | 2,5 |
| ERSTEIN 36,71 | 0272-6X-0276 | 994,122 | 2395,543 | | ER4 | 34,21 | 39,21 | 36,71 | 2,5 |
| ERSTEIN 24,71 | 0272-6X-0276 | 994,122 | 2395,543 | | ER3 | 22,21 | 27,21 | 24,71 | 2,5 |
| ERSTEIN 12,71 | 0272-6X-0276 | 994,122 | 2395,543 | | ER2 | 10,21 | 15,21 | 12,71 | 2,5 |
| ERSTEIN 4,21 | 0272-6X-0276 | 994,122 | 2395,543 | | ER1 | 1,71 | 6,71 | 4,21 | 2,5 |

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

| forage | N° BSS/LR | X Lambert 2 et/ Rechtswert | Y Lambert 2 et/ Hochwert | Z (m) | label | prof. crep. deb. | prof. crep. fin | prof. moy. | long. interv. crep. |
|--|------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------------|-----------------------|---------------|---------------------------|
| HEITERSHEIM-ESCHBACH / QUARTÄR | | | | | | | | | |
| HEITERSHEIM-E. GWM II | 0295/021-0 | 3398820 | 5306430 | 217 | HE1 | 46 | 51 | 48,5 | 2,5 |
| HEITERSHEIM-ESCHBACH / TERTIÄR | | | | | | | | | |
| HEITERSHEIM-E. GWM III | 0296/021-5 | 3398820 | 5306430 | 217 | HE2 | 64 | 91 | 77,5 | 13,5 |
| BREISACH TP1 / TIEFE MEßSTELLE | | | | | | | | | |
| BREISACH TP1 66 | 2013/019-8 | 3395682 | 5322211 | | BR1 | 63,1 | 68,1 | 65,6 | 2,5 |
| BREMgarten / TIEFE MEßSTELLE | | | | | | | | | |
| BREMgarten GWM I | 2030/020-3 | 3394153 | 5310545 | 204,4 | BG2 | 105 | 158 | 131,5 | 26,5 |
| BREMgarten / MITTLERE MEßSTELLE | | | | | | | | | |
| BREMgarten GWM Ia | 2031/020-9 | 3394153 | 5310545 | 204,4 | BG1 | 50 | 100 | 75 | 25 |
| BALGAU-FESSENHEIM | | | | | | | | | |
| BALGAU PM1 | 0379-5X-0094 PM1 | 990,475 | 338,01 | 205,5 | BA4 | 85 | 105 | 95 | 10 |
| BALGAU PM2 | 0379-5X-0095 PM2 | 990,475 | 338,01 | 205,5 | BA3 | 55 | 69 | 62 | 7 |
| BALGAU PM3 | 0379-5X-0096 PM3 | 990,475 | 338,01 | 205,5 | BA2 | 28,1 | 42,1 | 35,1 | 7 |
| BALGAU PM4 | 0379-5X-0097 PM4 | 990,475 | 338,01 | 205,5 | BA1 | 5 | 11 | 8 | 3 |
| NIEDERHERGHEIM | | | | | | | | | |
| NIEDERHERGHEIM PM1 | 378-3x-187 PM1 | 978,98 | 343,815 | 200,5 | NH4 | 106 | 136 | 121 | 15 |
| NIEDERHERGHEIM PM2 | 378-3x-188 PM2 | 978,98 | 343,815 | 200,5 | NH3 | 76 | 88 | 82 | 6 |
| NIEDERHERGHEIM PM3 | 378-3x-189 PM3 | 978,98 | 343,815 | 200,5 | NH2 | 46 | 58 | 52 | 6 |
| NIEDERHERGHEIM PM4 | 378-3x-190 PM4 | 978,98 | 343,815 | 200,5 | NH1 | 4,5 | 10,5 | 7,5 | 3 |

Tab.1 - Caractéristiques des forages

2. Travaux effectués et résultats

2.1. DIAGRAPHIES

Secteur de Strasbourg

Les mesures ont été réalisées sur les 5 forages les 19 et 20 Novembre 1996 par la Société TERRATEC comme sous-traitant.

Les paramètres mesurés sous conditions de pompage (pompe thermique) sont :

- le pH
- la température
- la conductivité
- le débit (au micromoulinet)

Les mesures de débit réalisées au micromoulinet devaient permettre de déterminer les niveaux crépinés réellement producteurs lors du pompage.

Ces mesures ont souvent été perturbées par la présence de sable dans les eaux d'exhaure. Ceci a été particulièrement le cas pour le forage d'Illkirch (272-3X-979) où le sable, provenant principalement du premier filtre bloquait le dispositif de mesure dès le début. En conséquence, les niveaux producteurs n'ont pas pu être déterminés pour cet ouvrage en dessous de 45 m.

Les résultats des mesures débitométriques sont résumés dans l'annexe 2.

Les mesures des paramètres physico-chimiques par diagraphie ont permis de déterminer le pH et la température au niveau des crépines. Comme ces deux paramètres sont susceptibles d'évoluer lors de la remontée des échantillons vers la surface, leur détermination in-situ est nécessaire pour réaliser une modélisation fiable des équilibres eau-roche sur la base des analyses chimiques.

Les mesures de conductivité permettent de mettre en évidence, de façon précise, une éventuelle stratification de la salinité des eaux de la nappe.

Une telle stratification peut être observée notamment dans le cas de Wolfisheim (annexe 2). La conductivité augmente de 1330 à 15000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la base de la dernière crépine. Les résultats des diagraphies sont présentés sous forme graphique en annexe 1.

2.2. PRELEVEMENTS ET ANALYSES SUR SITE

2.2.1. Prélèvements

1. Secteur de Strasbourg

Une première campagne d'échantillonnage géochimique et isotopique a été effectuée du 18 au 22 novembre 1996 sur les cinq forages multi-crèpinés du secteur de Strasbourg.

Avant chaque série d'échantillonnage, un volume d'eau supérieur au double du volume contenu dans le puits a été évacué avec une pompe thermique de surface (4"). Lors du pompage, un suivi de l'évolution de la conductivité à la sortie de la pompe thermique a été réalisé. La poursuite du pompage jusqu'à la stabilisation de la conductivité a permis le contrôle de la représentativité des prélèvements.

Le pompage a été maintenu à un débit constant (entre 10 et 20 m³/h) pendant la durée des prélèvements. Le type de pompe était identique à celui utilisé lors des diagraphies pour assurer un débit maximal similaire.

L'échantillonnage a été réalisé à l'aide d'une pompe pneumatique à azote. Ce dispositif de prélèvement permet d'échantillonner à des profondeurs maximales supérieures à 100 m sans que l'échantillon ne rentre en contact avec l'azote. Pour les forages peu profonds une pompe immergée 2" GRUNDFOSS[®] MP1 a été utilisée.

2. Secteur de Benfeld

Plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été réalisées depuis la réalisation des piézomètres en juin 1996. Les prélèvements ont été sous-traités à la société EAT Environnement. Les échantillons pour les analyses isotopiques de la présente étude ont été prélevés dans le cadre de la campagne qui a eu lieu du 11 au 13 novembre 1997. Les prélèvements sur les forages multi-crèpinés ont été effectués entre obturateurs à l'aide d'une pompe submersible. Les paramètres physico-chimiques pH, température, conductivité et oxygène dissous ont été mesurés au cours du pompage entre packers et les prélèvements ont été effectués après stabilisation des 4 paramètres.

3. Secteur de Breisach-Fessenheim

Les échantillons pour analyses isotopiques sur les 5 ouvrages du secteur de Breisach ont été prélevés par pompe immergée par la société Hydroisotop pour le Landesamt für Umweltschutz (LFU) du Land Baden-Württemberg en août 1998. La société BURGEAP a assuré les prélèvements dans le forage de Balgau à l'aide d'une pompe immergée 2" GRUNDFOSS[®] MP1 équipée d'un tuyau en téflon le 02/11/98.

4. Secteur de Niederhergheim-Hettenschlag

La société BURGEAP a assuré les prélèvements par pompe immergée dans le forage multitube profond de Niederhergheim. Les prélèvements ont eu lieu le 22/01/99.

2.2.2. Mesures réalisées sur le terrain

Pour chaque niveau prélevé les paramètres physico-chimiques suivants ont été déterminés sur le terrain :

pH, conductivité, température, oxygène dissous.

Les analyses sur le terrain ainsi que le conditionnement des échantillons suivent les recommandations des modes opératoires BRGM MO059 et MO120. Les résultats sont résumés dans le tableau 2.

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

| échant. | | Temp. | pH | | conduct. | O ₂ diss. | |
|----------------------|-------|-------|------------|------------|----------|----------------------|-------------|
| forage | label | °C | c.e. a. | c.e. a. | µS/cm | c.e. a. | c.e. a. |
| HOLTZHEIM | | | | | | | |
| HOLTZ 47.75 | HO3 | 10.7 | (1) | 7.17 | (1) | 546 | (1) 4.0 (1) |
| HOLTZ 31.1 | HO2 | 11.1 | (1) | 7.30 | (1) | 540 | (1) 4.5 (1) |
| HOLTZ 14.25 | HO1 | 11.2 | (1) | 7.30 | (1) | 547 | (1) 4.1 (1) |
| WOLFISHEIM | | | | | | | |
| WOLF 46.2 | WO3 | 10.7 | (1) | 7.59 | (1) | 21400 | (1) 1.7 (1) |
| WOLF 32.2 | WO2 | 10.0 | (1) | 7.54 | (1) | 475 | (1) 0.9 (1) |
| WOLF 15.25 | WO1 | 10.5 | (1) | 7.10 | (1) | 512 | (1) 2.0 (1) |
| HOENHEIM | | | | | | | |
| HOEN 114.25 | HN7 | 11.2 | (1) | 9.62 | (1) | 337 | (1) 1.5 (1) |
| HOEN 91.75 | HN6 | 10.4 | (1) | 9.55 | (1) | 313 | (1) 0.9 (1) |
| HOEN 74.75 | HN5 | 9.8 | (1) | 9.60 | (1) | 313 | (1) 1.4 (1) |
| HOEN 61.25 | HN4 | 10.4 | (1) | 7.72 | (1) | 407 | (1) 1.1 (1) |
| HOEN 46.25 | HN3 | 10.1 | (1) | 7.54 | (1) | 451 | (1) 1.8 (1) |
| HOEN 31.25 | HN2 | 9.9 | (1) | 6.74 | (1) | 555 | (1) 1.7 (1) |
| HOEN 14.75 | HN1 | 10.9 | (1) | 6.92 | (1) | 529 | (1) 2.7 (1) |
| ILLKIRCH | | | | | | | |
| ILLK 145.75 | IL8 | 10.5 | (1) | 7.71 | (1) | 875 | (1) 0.0 (1) |
| ILLK 116.25 | IL7 | 10.0 | (1) | 7.34 | (1) | 791 | (1) 1.7 (1) |
| ILLK 104.75 | IL6 | 10.5 | (1) | 7.53 | (1) | 816 | (1) 2.2 (1) |
| ILLK 91.25 | IL5 | 10.5 | (1) | 7.58 | (1) | 776 | (1) 0.9 (1) |
| ILLK 76.75 | IL4 | 10.7 | (1) | 7.62 | (1) | 782 | (1) 2.6 (1) |
| ILLK 61.3 | IL3 | 10.8 | (1) | 7.64 | (1) | 771 | (1) 2.4 (1) |
| ILLK 44.75 | IL2 | 10.6 | (1) | 7.62 | (1) | 764 | (1) 2.1 (1) |
| ILLK 13.8 | IL1 | 10.6 | (1) | 7.50 | (1) | 557 | (1) 3.3 (1) |
| PFULGRIESHEIM | | | | | | | |
| PFUL 54 | PF1 | 7.7 | (1) | 8.08 | (1) | 488 | (1) 1.6 (1) |
| PFUL | PFg | 8.1 | (1) | 7.28 | (1) | 599 | (1) 1.0 (1) |
| BENFELD | | | | | | | |
| BENFELD 82.26 | BE8 | 12.6 | (2) | 7.30 | (2) | 573 | (2) 4.3 (2) |
| BENFELD 66.76 | BE7 | 13.1 | (2) | 7.40 | (2) | 571 | (2) 3.9 (2) |
| BENFELD 54.76 | BE6 | 13.1 | (2) | 7.30 | (2) | 573 | (2) 4.3 (2) |
| BENFELD 42.76 | BE5 | 13.2 | (2) | 7.40 | (2) | 572 | (2) 4.0 (2) |
| BENFELD 30.76 | BE4 | 13.1 | (2) | 7.40 | (2) | 572 | (2) 4.2 (2) |
| BENFELD 18.76 | BE3 | 13.3 | (2) | 7.40 | (2) | 570 | (2) 4.2 (2) |
| BENFELD 10.26 | BE2 | 13.40 | (2) | 7.40 | (2) | 573 | (2) 4.5 (2) |
| BENFELD 4.26 | BE1 | 12.10 | (2) | 7.20 | (2) | 580 | (2) 4.7 (2) |
| SAND | | | | | | | |
| SAND 77.41 | SA7 | 11.6 | (2) | 7.40 | (2) | 639 | (2) 3.3 (2) |
| SAND 65.41 | SA6 | 11.7 | (2) | 7.40 | (2) | 627 | (2) 2.4 (2) |
| SAND 53.41 | SA5 | 12.7 | (2) | 7.40 | (2) | 629 | (2) 2.4 (2) |
| SAND 41.41 | SA4 | 12.5 | (2) | 7.40 | (2) | 633 | (2) 1.6 (2) |
| SAND 29.41 | SA3 | 12.4 | (2) | 7.40 | (2) | 643 | (2) 2.3 (2) |
| SAND 17.41 | SA2 | 12.5 | (2) | 7.30 | (2) | 653 | (2) 1.8 (2) |
| SAND 5.41 | SA1 | 12.8 | (2) | 7.15 | (2) | 834 | (2) 3.3 (2) |
| ERSTEIN | | | | | | | |
| ERSTEIN 74.96 | ER8 | 13.2 | (2) | 7.70 | (2) | 587 | (2) 2.7 (2) |
| ERSTEIN 66.71 | ER7 | 13.2 | (2) | 7.20 | (2) | 592 | (2) 5.3 (2) |
| ERSTEIN 54.71 | ER6 | 13.2 | (2) | 7.40 | (2) | 608 | (2) 3.2 (2) |
| ERSTEIN 45.21 | ER5 | 13.1 | (2) | 7.30 | (2) | 602 | (2) 2.6 (2) |
| ERSTEIN 36.71 | ER4 | 13.2 | (2) | 7.40 | (2) | 610 | (2) 3.0 (2) |
| ERSTEIN 24.71 | ER3 | 13.8 | (2) | 7.40 | (2) | 620 | (2) 3.4 (2) |
| ERSTEIN 12.71 | ER2 | 13.1 | (2) | 7.40 | (2) | 632 | (2) 2.9 (2) |
| ERSTEIN 4.21 | ER1 | 12.1 | (2) | 7.30 | (2) | 631 | (2) 3.5 (2) |

| échant. | | Temp. | pH | conduct. | O ₂ diss. |
|--|-------|----------|----------|------------|----------------------|
| forage | label | °C | | [µS/cm] | [mg/l] |
| | | | c.e.a. | c.e.a. | c.e.a. |
| HEITERSHEIM-ESCHBACH / QUARTÄR | | | | | |
| HEITERSHEIM-E. GWM II | HE1 | 15,0 (4) | 7,0 (4) | 2218 (4) | 0 (4) |
| HEITERSHEIM-ESCHBACH / TERTIÄR | | | | | |
| HEITERSHEIM-E. GWM III | HE2 | 13,1 (4) | 7,1 (4) | 2193 ? (4) | 0 (4) |
| BREISACH TP1 / TIEFE MEßSTELLE | | | | | |
| BREISACH TP1 66 | BR1 | 13,1 (4) | 7,3 (4) | 2224 (4) | 2,6 (4) |
| BREMgarten / TIEFE MEßSTELLE | | | | | |
| BREMgarten GWM I | BG2 | 13,3 (4) | 7,5 (4) | 20800 (4) | 4,5 (4) |
| BREMgarten / MITTLERE MEßSTELLE | | | | | |
| BREMgarten GWM Ia | BG1 | 13,4 (4) | 7,6 (4) | 1067 (4) | 6,1 (4) |
| BALGAU-FESSENHEIM | | | | | |
| BALGAU PM1 | BA4 | 13,0 (3) | 8,7 (3) | 15707 (3) | 3,52 (3) |
| BALGAU PM2 | BA3 | 13,0 (3) | 7,9 (3) | 1220 (3) | 5,84 (3) |
| BALGAU PM3 | BA2 | 12,0 (3) | 7,9 (3) | 590 (3) | 6,95 (3) |
| BALGAU PM4 | BA1 | 12,4 (3) | 7,7 (3) | 590 (3) | 6,95 (3) |
| NIEDERHERGHEIM | | | | | |
| NIEDERHERGHEIM PM1 | NH4 | 11,4 (3) | 7,5 (3) | 1650 (3) | 4,85 (3) |
| NIEDERHERGHEIM PM2 | NH3 | 11,8 (3) | 8,8 (3) | 1220 (3) | 5,58 (3) |
| NIEDERHERGHEIM PM3 | NH2 | 10,8 (3) | 10,1 (3) | 1008 (3) | 7,1 (3) |
| NIEDERHERGHEIM PM4 | NH1 | 10,2 (3) | 7,4 (3) | 1420 (3) | 9,5 (3) |

c.e.a. =conditions

d'échantillonnage et d'analyse

(1) BRGM/ANALYSES Orléans

(2) EAT Environnement, Schilligheim

(3) Burgéap/LSEH Lyon

(4) LfU Baden Württemberg

(5) Hydroisotop, Schweitenkirchen

Tab.2 - Résultats d'analyses : Paramètres physico-chimiques

2.3. RESULTATS CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

2.3.1. Programme d'analyses

Le programme d'analyses chimiques et isotopiques sur les eaux comprend :

- Anions et cations majeurs
- Herbicides (sur une partie des ouvrages)
- Composés organiques volatils (sur une partie des ouvrages)
- Carbone organique dissous (sur une partie des ouvrages)
- éléments traces B et Br (sur les forages du secteur de Breisach)
- Isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O et ^2H)
- Tritium
- $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique total dissous (CITD) (sur une partie des ouvrages)
- Activité ^{14}C du CITD (sur une partie des ouvrages)
- $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{34}\text{S}$ des sulfates (sur une partie des ouvrages)
- $\delta^{11}\text{B}$ du bore dissous (sur les forages du secteur de Breisach).

Les analyses des isotopes du carbone et du soufre sont limitées à un nombre restreint d'échantillons prélevés à proximité du fond des forages, les éléments traces bore et brome ainsi que les isotopes du B ont été déterminés sur les échantillons du secteur de Breisach dans l'objectif de mieux contraindre les sources de salinité.

Dans 5 échantillons de roche (graviers calcaires altérés et frais, ciment carbonaté et encroûtements calcitiques) prélevés à différentes profondeurs dans l'aquifère alluvial ont été déterminés

- $\delta^{13}\text{C}$ de la calcite
- $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite

dans le but de définir les mécanismes d'interaction eau-carbonates. Les deux forages qui ont fourni les échantillons solides sont ceux de Niederhergheim (code BSS : 378-3X-187 à 190) et de Balgau (code BSS : 379-5X-0094 à 0097).

2.3.2. Analyses chimiques des eaux

Le tableau 3 résume les techniques analytiques employées ainsi que les précisions sur les mesures. Les limites de détection dépendent de la méthode et du coefficient de dilution. Les balances ioniques restent pour la majorité des analyses en dessous de 5% à l'exception du forage de Hoenheim pour lequel les balances sont systématiquement positives (de 8,5 à 17 %). Ceci peut être dû à une surestimation d'un ou plusieurs cations ou à une non prise en compte d'une espèce anionique. Les tableaux 4 à 5 donnent les résultats des analyses chimiques (éléments majeurs et traces, composantes organiques pour les ouvrages du secteur Strasbourg).

| Paramètres | Technique analytique | Précision |
|---|---|---------------|
| Mesures de terrain | | |
| pH | potentiométrie | 0,01pH |
| T | thermométrie | 0,1 °C |
| Oxygène | oxymétrie | 0,01 mg/l |
| conductivité | conductivimétrie | 0,5% |
| Analyses hors site : chimie | | |
| Na, K, Ca, Mg | ICP/MS | 5 - 10% |
| Cl, SO ₄ , NO ₃ | chromatographie ionique | 2 - 10% |
| alcalinité | potentiométrie | 0,5 - 5% |
| Triazines | HPLC/UV | 10-15% |
| Composés organohalogénés volatils | chromatographie gazeuse GC/ECD/Head space | 10-15% |
| Analyses hors site : isotopes | | |
| $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ | spectrométrie de masse à source gazeuse | 0,1 ‰ |
| $\delta^2\text{H}(\text{H}_2\text{O})$ | spectrométrie de masse à source gazeuse | 0,8-1 ‰ |
| ^3H | scintillation liquide après enrichissement électrolytique | ~10% |
| $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4)$ | spectrométrie de masse en phase gazeuse | 0,1 ‰ |
| $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4)$ | spectrométrie de masse en phase gazeuse | 0,3 ‰ |
| $\delta^{13}\text{C}(\text{CITD})$ | spectrométrie de masse à source gazeuse | 0,1 ‰ |
| $\text{A}^{14}\text{C}(\text{CITD})$ | spectrométrie de masse par accélérateur | ~ 0,5 % (pmc) |
| $\delta^{11}\text{B}$ | spectrométrie de masse à thermoionisation | 0.4 ‰ |

Tab.3 - Techniques d'analyses et précision sur les mesures (BRGM)

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

| échant. | COD | Tetrachlorure de C | Trichloro-éthylène | Dichloro-méthane | Chloroforme | 1,1,1-Trichloro-éthane | Dibromomono-chlorométhane | Dichloromono-bromométhane | Tétrachloro-éthylène | 1,2-Dichloro-éthane | 1,1-Dichloro-éthane | 1,1-Dichloro-éthylène | 1,1-c-Dichloro-éthylène | Atrazine | Simazine | Deséthyl-atrazine | Desisopropyl-atrazine | Tertbutylazine | Diuron | Isoproturon |
|----------------------|-------------|--------------------|--------------------|------------------|-------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|----------|----------|-------------------|-----------------------|----------------|--------|-------------|
| | | mg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l | µg/l |
| HOLZHEIM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HOLZ | 54,9-57,4 | - | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | - | - | - | - | - | - | - |
| HOLZ | 47,0-48,5 | 1,9 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOLZ | 30,2-32,0 | 1,8 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOLZ | 13,5-15,0 | 1,9 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| WOLFISHEIM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WOLF | 45,4-47,0 | 1,6 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| WOLF | 31,4-33,0 | 1,7 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| WOLF | 14,5-16,0 | 1,8 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOENHEIM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HOEN | 113,0-115,5 | - | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOEN | 91,0-92,5 | 1,9 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOEN | 74,0-75,5 | 1,8 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOEN | 60,5-62,0 | 1,4 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOEN | 45,5-47,0 | 1,7 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOEN | 30,5-32,0 | 1 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| HOEN | 14,0-15,5 | 1,8 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | 6 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| ILLKIRCH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ILLK | 145,0-146,5 | 2,5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| ILLK | 115,5-117,0 | 1,9 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| ILLK | 104,0-105,5 | 2,1 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| ILLK | 90,5-92,0 | 1,5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| ILLK | 76-77,5 | 1,7 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| ILLK | 60,5-62,1 | 1,3 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| ILLK | 44,0-45,5 | 1,6 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| ILLK | 13,1-14,5 | 1,9 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| PFULGRIESHEIM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PFUL | 80,0-82,0 | 2,5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| PFUL | global | 2,1 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |

Laboratoire : BRGM

Tab. 4 - Résultats d'analyses (secteur de Strasbourg) : Carbone organique dissous, Triazines et COV

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

| échant. | | Ca | Mg | Na | K | HCO ₃ | CO ₃ | Cl | SO ₄ | NO ₃ |
|----------------------|-------|-----------|----------|-----------|---------|------------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|
| forage | label | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| HOLTZHEIM | | | | | | | | | | |
| HOLTZ 66,15 | HO4 | | | | | | | | | |
| HOLTZ 47,75 | HO3 | 100 (1) | 23,6 (1) | 21 (1) | 3 (1) | 317 (1) | 0 (1) | 73,4 (1) | 41,4 (1) | 24,7 (1) |
| HOLTZ 31,1 | HO2 | 99,8 (1) | 23,7 (1) | 20,8 (1) | 3 (1) | 318 (1) | 3 (1) | 41,6 (1) | 73,8 (1) | 24,8 (1) |
| HOLTZ 14,25 | HO1 | 101,8 (1) | 24,5 (1) | 21 (1) | 3,4 (1) | 320 (1) | 3 (1) | 42,4 (1) | 75,1 (1) | 25 (1) |
| WOLFISHEIM | | | | | | | | | | |
| WOLF 46,2 | WO3 | 98,5 (1) | 36,3 (1) | 331 (1) | 2,4 (1) | 175 (1) | 3 (1) | 650 (1) | 20,7 (1) | 9,8 (1) |
| WOLF 32,2 | WO2 | 66,1 (1) | 9,2 (1) | 9,4 (1) | 1,5 (1) | 199 (1) | 3 (1) | 20,3 (1) | 29,1 (1) | 14,2 (1) |
| WOLF 15,25 | WO1 | 71,9 (1) | 10,4 (1) | 10,1 (1) | 1,7 (1) | 225 (1) | 3 (1) | 19,9 (1) | 39,4 (1) | 8,7 (1) |
| HOENHEIM | | | | | | | | | | |
| HOEN 114,25 | HN7 | | | | | | | | | |
| HOEN 91,75 | HN6 | 4,5 (1) | 10,3 (1) | 32,6 (1) | 4,9 (1) | 76 (1) | 3 (1) | 56,8 (1) | 1,6 (1) | 0,1 (1) |
| HOEN 74,75 | HN5 | 13,4 (1) | 10,8 (1) | 21,4 (1) | 4,5 (1) | 100 (1) | 3 (1) | 54,7 (1) | 4,2 (1) | 1,7 (1) |
| HOEN 61,25 | HN4 | 59,3 (1) | 14,8 (1) | 15,5 (1) | 2,6 (1) | 233 (1) | 3 (1) | 48,1 (1) | 23,6 (1) | 5,1 (1) |
| HOEN 46,25 | HN3 | 67 (1) | 14,3 (1) | 15,4 (1) | 2,1 (1) | 242 (1) | 3 (1) | 49,7 (1) | 27 (1) | 5,9 (1) |
| HOEN 31,25 | HN2 | | | | | | | | | |
| HOEN 14,75 | HN1 | 74 (1) | 13,4 (1) | 20,6 (1) | 2,6 (1) | 256 (1) | 3 (1) | 55,8 (1) | 35,7 (1) | 6,7 (1) |
| ILL 0 | | | | | | | | | | |
| ILLKIRCH | | | | | | | | | | |
| ILLK 145,75 | IL8 | 74,1 (1) | 15,4 (1) | 136,8 (1) | 2,3 (1) | 225 (1) | 3 (1) | 236,5 (1) | 45,8 (1) | 2,8 (1) |
| ILLK 116,25 | IL7 | 73,8 (1) | 15,2 (1) | 125,3 (1) | 2,3 (1) | 217 (1) | 3 (1) | 218 (1) | 45,8 (1) | 3,1 (1) |
| ILLK 104,75 | IL6 | 71,2 (1) | 14,8 (1) | 131 (1) | 2,3 (1) | 215 (1) | 3 (1) | 225,3 (1) | 46,4 (1) | 3 (1) |
| ILLK 91,25 | IL5 | 74,9 (1) | 15,4 (1) | 115,8 (1) | 2,2 (1) | 218 (1) | 3 (1) | 206,7 (1) | 43 (1) | 3,3 (1) |
| ILLK 76,75 | IL4 | 74,2 (1) | 15,5 (1) | 119,5 (1) | 2,2 (1) | 215 (1) | 3 (1) | 217,7 (1) | 43,3 (1) | 3,1 (1) |
| ILLK 61,3 | IL3 | 73,6 (1) | 15,4 (1) | 112,1 (1) | 2,2 (1) | 215 (1) | 3 (1) | 200 (1) | 42,7 (1) | 3,2 (1) |
| ILLK 44,75 | IL2 | 74,8 (1) | 15,4 (1) | 112,2 (1) | 2,3 (1) | 215 (1) | 3 (1) | 197 (1) | 42 (1) | 3,4 (1) |
| ILLK 13,8 | IL1 | 91,6 (1) | 13,2 (1) | 44,7 (1) | 2,4 (1) | 259 (1) | 3 (1) | 97,4 (1) | 36 (1) | 7,3 (1) |
| PFULGRIESHEIM | | | | | | | | | | |
| PFUL 54 | PF1 | 108,3 (1) | 30,5 (1) | 8,1 (1) | 0,9 (1) | 395 (1) | 3 (1) | 26,4 (1) | 68,6 (1) | 6,6 (1) |
| PFUL | PFg | 113,4 (1) | 31,5 (1) | 7,8 (1) | 0,8 (1) | 409 (1) | 3 (1) | 25,5 (1) | 72,9 (1) | 1,7 (1) |
| BENFELD | | | | | | | | | | |
| BENFELD 82,26 | BE8 | | (2) | (2) | 16 (2) | 2,0 (2) | 213 (2) | (2) | 49 (2) | 16 (2) |
| BENFELD 66,76 | BE7 | | (2) | (2) | 15 (2) | 1,9 (2) | 215 (2) | (2) | 50 (2) | 15 (2) |
| BENFELD 54,76 | BE6 | | (2) | (2) | 15 (2) | 2,0 (2) | 219 (2) | (2) | 49 (2) | 14 (2) |
| BENFELD 42,76 | BE5 | | (2) | (2) | 15 (2) | 1,9 (2) | 213 (2) | (2) | 50 (2) | 15 (2) |
| BENFELD 30,76 | BE4 | | (2) | (2) | 15 (2) | 2,0 (2) | 229 (2) | (2) | 50 (2) | 15 (2) |
| BENFELD 18,76 | BE3 | | (2) | (2) | 15 (2) | 1,9 (2) | 216 (2) | (2) | 51 (2) | 16 (2) |
| BENFELD 10,28 | BE2 | | (2) | (2) | 15 (2) | 1,9 (2) | 216 (2) | (2) | 50 (2) | 15 (2) |
| BENFELD 4,26 | BE1 | | (2) | (2) | 15 (2) | 1,9 (2) | 213 (2) | (2) | 50 (2) | 15 (2) |

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

| forage | échant. | label | Ca | Mg | Na | K | HCO ₃ | CO ₃ | Cl | SO ₄ | NO ₃ | B | Br | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|-------|--------|------|--------|------|------------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|------|------|---------|------|-------|-----|------|-----|-------|-----|------|-----|
| | | | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | µg/l | mg/l | µg/l | | | | | | | | |
| SAND | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | SAND 77,41 | SA7 | (2) | (2) | 22 | (2) | 2,9 | (2) | 230 | (2) | (2) | 54 | (2) | 21 | (2) | 15 | (2) | | | | | | |
| | SAND 65,41 | SA6 | (2) | (2) | 21 | (2) | 3,8 | (2) | 227 | (2) | (2) | 55 | (2) | 20 | (2) | 11 | (2) | | | | | | |
| | SAND 53,41 | SA5 | (2) | (2) | 21 | (2) | 3,7 | (2) | 226 | (2) | (2) | 53 | (2) | 20 | (2) | 10 | (2) | | | | | | |
| | SAND 41,41 | SA4 | (2) | (2) | 21 | (2) | 4,0 | (2) | 227 | (2) | (2) | 52 | (2) | 21 | (2) | 11 | (2) | | | | | | |
| | SAND 29,41 | SA3 | (2) | (2) | 22 | (2) | 4,3 | (2) | 233 | (2) | (2) | 51 | (2) | 22 | (2) | 12 | (2) | | | | | | |
| | SAND 17,41 | SA2 | (2) | (2) | 24 | (2) | 4,5 | (2) | 238 | (2) | (2) | 52 | (2) | 22 | (2) | 13 | (2) | | | | | | |
| | SAND 5,41 | SA1 | (2) | (2) | 25 | (2) | 4,1 | (2) | 290 | (2) | (2) | 49 | (2) | 44 | (2) | 45 | (2) | | | | | | |
| ERSTEIN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ERSTEIN 74,96 | ER8 | (2) | (2) | 12 | (2) | 1,5 | (2) | 192 | (2) | (2) | 58 | (2) | 19 | (2) | 13 | (2) | | | | | | |
| | ERSTEIN 66,71 | ER7 | (2) | (2) | 13 | (2) | 1,5 | (2) | 192 | (2) | (2) | 59 | (2) | 20 | (2) | 12 | (2) | | | | | | |
| | ERSTEIN 54,71 | ER6 | (2) | (2) | 14 | (2) | 1,6 | (2) | 196 | (2) | (2) | 61 | (2) | 20 | (2) | 12 | (2) | | | | | | |
| | ERSTEIN 45,21 | ER5 | (2) | (2) | 14 | (2) | 1,6 | (2) | 197 | (2) | (2) | 60 | (2) | 20 | (2) | 13 | (2) | | | | | | |
| | ERSTEIN 36,71 | ER4 | (2) | (2) | 14 | (2) | 1,6 | (2) | 196 | (2) | (2) | 60 | (2) | 20 | (2) | 13 | (2) | | | | | | |
| | ERSTEIN 24,71 | ER3 | (2) | (2) | 14 | (2) | 1,6 | (2) | 198 | (2) | (2) | 60 | (2) | 21 | (2) | 13 | (2) | | | | | | |
| | ERSTEIN 12,71 | ER2 | (2) | (2) | 15 | (2) | 1,6 | (2) | 205 | (2) | (2) | 61 | (2) | 22 | (2) | 15 | (2) | | | | | | |
| | ERSTEIN 4,21 | ER1 | (2) | (2) | 15 | (2) | 1,8 | (2) | 202 | (2) | (2) | 61 | (2) | 22 | (2) | 14 | (2) | | | | | | |
| HEITERSHEIM-ESCHBACH / QUARTÄR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | HEITERSHEIM-E. GWM II | HE1 | 340,0 | (4) | 62,70 | (4) | 410 | (4) | 2,9 | (4) | 275,72 | (4) | (4) | 758 | (1) | 857,5 | (4) | 14,6 | (4) | 55 | (1) | 0,68 | (1) |
| HEITERSHEIM-ESCHBACH / TERTIÄR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | HEITERSHEIM-E. GWM III | HE2 | 997,0 | (4) | 172,00 | (4) | 1110 | (4) | 5,8 | (4) | 209,23 | (4) | (4) | 3184 | (1) | 1410 | (4) | 4,8 | (4) | 152 | (1) | 2,52 | (1) |
| BREISACH TP1 / TIEFE MEßSTELLE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | BREISACH TP1 66 | BR1 | 279,0 | (4) | 31,10 | (4) | 93,6 | (4) | 4,4 | (4) | 201,91 | (4) | (4) | 637 | (1) | 33,7 | (4) | 10,6 | (4) | 21 | (1) | 0,8 | (1) |
| BREMGGARTEN / TIEFE MEßSTELLE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | BREMGGARTEN GWM I | BG2 | 316,0 | (4) | 43,20 | (4) | 4330 | (4) | 109,0 | (4) | 259,86 | (4) | (4) | 6795 | (1) | 145,6 | (4) | 0 | (4) | 52 | (1) | 6,63 | (1) |
| BREMGGARTEN / MITTLERE MEßSTELLE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | BREMGGARTEN GWM Ia | BG1 | 77,9 | (4) | 10,80 | (4) | 115 | (4) | 8,6 | (4) | 234,85 | (4) | (4) | 194,00 | (1) | 33,1 | (4) | 18,1 | (4) | 35,00 | (1) | 0,39 | (1) |
| BALGAU-FESSENHEIM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | BALGAU PM1 | BA4 | 1207,0 | (3) | 150,50 | (3) | 1804 | (3) | 19,8 | (3) | 35,4 | (3) | (3) | 5490,00 | (3) | 18 | (3) | 9 | (3) | | | | |
| | BALGAU PM2 | BA3 | 147,0 | (3) | 24,40 | (3) | 97,7 | (3) | 7,3 | (3) | 170 | (3) | (3) | 369,00 | (3) | 31,9 | (3) | 12,9 | (3) | | | | |
| | BALGAU PM3 | BA2 | 96,0 | (3) | 14,10 | (3) | 17 | (3) | 1,8 | (3) | 203 | (3) | (3) | 96,00 | (3) | 29,5 | (3) | 16,7 | (3) | | | | |
| | BALGAU PM4 | BA1 | 80,0 | (3) | 11,00 | (3) | 8,4 | (3) | 1,8 | (3) | 203 | (3) | (3) | 43,20 | (3) | 30 | (3) | 17,2 | (3) | | | | |
| NIEDERHERGHEIM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | NIEDERHERGHEIM PM1 | NH4 | 208,0 | (3) | 18,30 | (3) | 48,8 | (3) | 2,5 | (3) | 133,59 | (3) | (3) | 408,00 | (3) | 20,3 | (3) | 13,5 | (3) | | | | |
| | NIEDERHERGHEIM PM2 | NH3 | 131,0 | (3) | 14,00 | (3) | 76,5 | (3) | 6,4 | (3) | 48,19 | (3) | (3) | 342,00 | (3) | 24,2 | (3) | 19,9 | (3) | | | | |
| | NIEDERHERGHEIM PM3 | NH2 | 94,0 | (3) | 10,80 | (3) | 64,1 | (3) | 6,3 | (3) | 10 | (3) | (3) | 258,00 | (3) | 28,8 | (3) | 26,5 | (3) | | | | |
| | NIEDERHERGHEIM PM4 | NH1 | 159,0 | (3) | 15,10 | (3) | 65,6 | (3) | 3,9 | (3) | 247,05 | (3) | (3) | 250,00 | (3) | 35,1 | (3) | 39,5 | (3) | | | | |

c.e.a. =condition
d'échantillonnage
(1) BRGM/ANA
(2) EAT Enviror
(3) Burgéap/LSt
(4) LfU Baden V
(5) Hyrolsotop :

Tab. 5 - Résultats d'analyses : Eléments majeurs et traces

2.3.3. Analyses isotopiques

On utilise comme traceurs les isotopes de la molécule d'eau et ceux de certaines espèces dissoutes.

Isotopes rares :

- de la molécule d'eau : - ^2H
- ^{18}O
- ^3H
- des espèces dissoutes : - ^{13}C et ^{14}C du carbone inorganique
- ^{18}O et ^{34}S des sulfates
- ^{11}B du bore dissous

Ils servent à :

- estimer l'origine de l'eau (altitude, période de recharge, température de recharge, identification des eaux "fossiles" : ^{18}O et ^2H)
- estimer le temps de résidence de l'eau dans l'aquifère par des méthodes radiométriques (^{14}C , ^3H)
- estimer l'origine des composés dissous (^{13}C pour les espèces du carbone, carbonates, bicarbonates..., ^{34}S et ^{18}O des sulfates pour distinguer l'origine des sulfates dissous, $\delta^{11}\text{B}$ pour identifier l'origine du bore dissous ou, de façon plus générale, de la salinité)

Les concentrations isotopiques sont généralement exprimées en valeur relative ou unité delta (δ) par rapport à un étalon :

$$\delta = \frac{R_{(\text{échantillon})} - R_{(\text{étalon})}}{R_{(\text{étalon})}} \cdot 1000 \text{ (en ‰) ou}$$

$$\delta = \left(\frac{R_{(\text{échantillon})}}{R_{(\text{étalon})}} - 1 \right) \cdot 1000$$

où R est le rapport isotopique $\frac{\text{Isotope rare}}{\text{Isotope abondant}}$ (exemple $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $R = ^2\text{H}/^1\text{H}$)

Les étalons utilisés sont

- Pour les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) le **SMOW** (Standard Mean Ocean Water)
- Pour les isotopes du soufre le **CDT** (Cañon Diablo Troïlite)
- Pour les isotopes stables du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et les isotopes de l'oxygène dans les carbonates ($\delta^{18}\text{O}$) le **PDB** (Pee Dee Formation Belemnite)
- Pour les isotopes du bore ($\delta^{11}\text{B}$) le **NBS 951**

Les résultats des analyses isotopiques sont résumés dans le tableau 6.

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

| échant. | | $\delta^{18}\text{O}$ (H ₂ O) | | $\delta^2\text{H}$ (H ₂ O) | | $\delta^{34}\text{S}$ (SO ₄) | | $\delta^{18}\text{O}$ (SO ₄) | | $\delta^{13}\text{C}$ (CITD) | | $\delta^{14}\text{C}$ (CITD) | |
|-------------------|-------|--|---|---------------------------------------|---|--|-----|--|---|------------------------------|-----------|------------------------------|--------------|
| forage | label | % vs SMOW | ‰ | % vs SMOW | ‰ | ‰ | ‰ | % vs SMOW | ‰ | % vs PDB | ‰ | % carb. mod | ‰ |
| HOLTZHEIM | | | | | | | | | | | | | |
| HOLTZ 47,75 | HO3 | -8,2 (1) | | -58,6 (1) | | 10 (1) | 2,0 | | | | -19,9 (1) | | 75,3 (1) 0,4 |
| HOLTZ 31,1 | HO2 | -8,3 (1) | | -58,4 (1) | | 9 (1) | 2,0 | | | | | | |
| HOLTZ 14,25 | HO1 | -8,3 (1) | | -58 (1) | | 10 (1) | 2,0 | | | | | | |
| WOLFISHEIM | | | | | | | | | | | | | |
| WOLF 46,2 | WO3 | -8,8 (1) | | -60,2 (1) | | 28 (1) | 3,0 | 6,3 | | 5,8 (1) | | -14,1 (1) | 59,7 (1) 0,3 |
| WOLF 32,2 | WO2 | -8,6 (1) | | -59 (1) | | 29 (1) | 3,0 | | | | | | |
| WOLF 15,25 | WO1 | -8,5 (1) | | -58,2 (1) | | 32 (1) | 4,0 | | | | | | |
| HOENHEIM | | | | | | | | | | | | | |
| HOEN 91,75 | HN6 | -8,6 (1) | | -61 (1) | | 16 (1) | 3,0 | | | | | | |
| HOEN 74,75 | HN5 | -8,8 (1) | | -60,6 (1) | | 15 (1) | 3,0 | | | | | | |
| HOEN 61,25 | HN4 | -9,1 (1) | | -63,7 (1) | | 10 (1) | 2,0 | | | | | | |
| HOEN 46,25 | HN3 | -9,3 (1) | | -64,9 (1) | | 14 (1) | 2,0 | | | | | | |
| HOEN 14,75 | HN1 | -9,4 (1) | | -65 (1) | | 19 (1) | 3,0 | | | | | | |
| ILL 0 | | -9,6 (1) | | -64,9 (1) | | 18 (1) | 3,0 | | | | | | |
| ILLKIRCH | | | | | | | | | | | | | |
| ILLK 145,75 | IL8 | -11,6 (1) | | -82,1 (1) | | 3 (1) | 1,0 | 17,6 (1) | | 14 (1) | | -8,8 (1) | 30,1 (1) 0,2 |
| ILLK 116,25 | IL7 | -12,2 (1) | | -82,1 (1) | | 6 (1) | 2,0 | | | | | | |
| ILLK 104,75 | IL6 | -11,8 (1) | | -81,6 (1) | | 12 (1) | 2,0 | | | | | | |
| ILLK 91,25 | IL5 | -11,7 (1) | | -81,9 (1) | | 12 (1) | 2,0 | | | | | | |
| ILLK 76,75 | IL4 | -11,6 (1) | | -82,1 (1) | | 9 (1) | 2,0 | | | | | | |
| ILLK 61,3 | IL3 | -11,6 (1) | | -81,9 (1) | | 10 (1) | 2,0 | | | | | | |
| ILLK 44,75 | IL2 | -10,6 (1) | | -74 (1) | | 30 (1) | 3,0 | | | | | | |
| BENFELD | | | | | | | | | | | | | |
| BENFELD 82,26 | BE8 | -9,1 (1) | | -66 (1) | | 11 (1) | 2,0 | | | | | | |
| BENFELD 4,26 | BE1 | -9,2 (1) | | -66,0 (1) | | 9 (1) | 2,0 | | | | | | |

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

| échant | | $\delta^{18}\text{O} (\text{H}_2\text{O})$ | $\delta^2\text{H} (\text{H}_2\text{O})$ | ^3H | $\delta^{34}\text{S} (\text{SO}_4)$ | $\delta^{18}\text{O} (\text{SO}_4)$ | $\delta^{13}\text{C} (\text{CITD})$ | $\Delta^{14}\text{C} (\text{CITD})$ | | |
|--|-------|--|---|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------|-----|
| forage | label | ‰ vs SMOW | ‰ vs SMOW | UT | ‰ vs CDT | ‰ vs SMOW | ‰ vs PDB | ‰ carb. mod | | |
| SAND | | | | | | | | | | |
| SAND 77,41 | SA7 | -8,8 (1) | -63,7 (1) | 16 (1) 3,0 | 5,7 (1) | | 8 (1) | | | |
| SAND 41,41 | SA4 | -8,9 (1) | -64,5 (1) | 14 (1) 2,0 | | | | | | |
| SAND 5,41 | SA1 | -8,0 (1) | -58,9 (1) | 17 (1) 3,0 | 4,1 (1) | | 7,7 (1) | | | |
| ERSTEIN | | | | | | | | | | |
| ERSTEIN 74,96 | ER8 | -8,7 (1) | -62,9 (1) | 14 (1) 2,0 | | (1) | | | | |
| ERSTEIN 4,21 | ER1 | -8,6 (1) | -63,4 (1) | 16 (1) 3,0 | | (1) | | | | |
| HEITERSHEIM-ESCHBACH / QUARTÄR | | | | | | | | | | |
| HEITERSHEIM-E. GWM II | HE1 | -9,5 (5) | -67 (5) | 7,4 (5) 1,0 | 11,9 (5) | | 17,9 (5) | -13,5 (5) | 36,5 (5) | 0,6 |
| HEITERSHEIM-ESCHBACH / TERTIÄR | | | | | | | | | | |
| HEITERSHEIM-E. GWM III | HE2 | -10,2 (5) | -71,5 (5) | 6 (5) 0,9 | 11,2 (5) | | 16,6 (5) | -14,5 (5) | | (5) |
| BREISACH TP1 / TIEFE MEßSTELLE | | | | | | | | | | |
| BREISACH TP1 66 | BR1 | -10,6 (5) | -76,5 (5) | 20,8 (5) 0,9 | 7,8 (5) | | 9,3 (5) | -13,5 (5) | 86,6 (5) | 5,8 |
| BREMgarten / TIEFE MEßSTELLE | | | | | | | | | | |
| BREMgarten GWM I | BG2 | -10,8 (5) | -77,9 (5) | 30,5 (5) 1,7 | 10,8 (5) | | 16,5 (5) | -5,7 (5) | 42,9 (5) | 5,4 |
| BREMgarten / MITTLERE MEßSTELLE | | | | | | | | | | |
| BREMgarten GWM Ia | BG1 | -10,9 (5) | -79,2 (5) | 40,1 (5) 2,0 | 6,9 (5) | | 9,0 (5) | -10,9 (5) | 86,7 (5) | 1,1 |
| BALGAU-FESSENHEIM | | | | | | | | | | |
| BALGAU PM1 | BA4 | -10,9 (1) | -77,8 (1) | 14 (1) 2,0 | 5,7 (1) | | 9,6 (1) | -8,7 (1) | 52,4 (1) | 0,4 |
| BALGAU PM2 | BA3 | -11,1 (1) | -79,5 (1) | 38 (1) 4,0 | | | | | | |
| BALGAU PM3 | BA2 | -11,1 (1) | -80,6 (1) | 37 (1) 4,0 | | | | | | |
| BALGAU PM4 | BA1 | -11,0 (1) | -79,7 (1) | 32 (1) 4,0 | | | | | | |
| NIEDERHERGHEIM | | | | | | | | | | |
| NIEDERHERGHEIM PM1 | NH4 | -9 (1) | -63,3 (1) | 17 (1) 3,0 | | | | | | |
| NIEDERHERGHEIM PM2 | NH3 | -9 (1) | -64,0 (1) | 29 (1) 3,0 | | | | | | |
| NIEDERHERGHEIM PM3 | NH2 | -8,8 (1) | -62,6 (1) | 24 (1) 3,0 | | | | | | |
| NIEDERHERGHEIM PM4 | NH1 | -8,4 (1) | -60,5 (1) | 21 (1) 3,0 | | | | | | |

c. e. a. =conditions
d'échantillonnage et d'analyse

(1) BRGM/ANALYSES Orléans
(2) EAT Environnement, Schiltigheim

(3) Burgéap/LSEH Lyon
(4) LfU Baden Württemberg

(5) Hyroisotop, Schweitenkirchen

Tab. 6 - Résultats d'analyses : Isotopes stables et radioactif de l'eau, isotopes du carbone inorganique dissous, isotopes stables des sulfates dissoutes.

| échant. | | | $\delta^{18}\text{O}$ (CaCO ₃) | $\delta^{18}\text{O}$ (CaCO ₃) | $\delta^{13}\text{C}$ (CaCO ₃) |
|-----------------------------------|-------|-----------------------|--|--|--|
| N° | prof. | remarques | % vs PDB | % vs SMOW | % vs PDB |
| Forage de Niederhergheim | | | | | |
| Ecroutement calcaire | 1m | encroûtement calcaire | -6,8 | 23,9 | -10,3 |
| Forage de Balgau/Nambsheim | | | | | |
| Nagelfluh Zement | 102 m | ciment calcitique | -9 | 21,6 | -5,6 |
| Verwitterte Kalke | 35 m | calcaires altérés | -3,8 | 26,9 | 1,6 |
| Verwitterte Kalke | 102 m | calcaires altérés | -6,9 | 23,7 | -2,7 |
| Frische Kalke | 17 m | calcaires sains | -4,5 | 26,2 | 0,6 |

Tab. 7 - Résultats d'analyses : Isotopes stables du carbone et de l'oxygène dans les constituants carbonatés des graviers et dans les ciments calcitiques (forages de Niederhergheim et Balgau-Nambsheim)

3. Discussion des résultats

3.1. CARACTERE CHIMIQUE DES EAUX

Le diagramme de Piper (fig. 2) permet de visualiser et d'apprécier le caractère chimique des eaux analysées ainsi que de les classer selon leur faciès chimique. Il est possible d'identifier facilement des processus de mélange (droites de mélange).

Les eaux peu profondes appartiennent au faciès bicarbonaté calcique. Ce caractère est sans doute attribuable aux interactions de l'eau avec les composantes carbonatées de la zone non saturée (loess) et de la matrice aquifère sablo-graveleuse.

Dans la partie plus profonde de l'aquifère mais également pour une partie des eaux <50 m, on observe deux tendances :

- Une évolution vers des eaux chlorurées alcalines avec comme pôle extrême l'eau du piézomètre de Bremgarten (niveau profond) qui présente un faciès Na-Cl, des concentrations très élevées en Na (4300 mg/l) et en Cl (6800 mg/l) et un rapport molaire Na/Cl proche de 1.
- Une tendance vers des eaux chlorurées calciques ou sulfatées calciques magnésiennes (forages de Heitersheim-Eschbach).

(1) La première tendance s'explique par une dissolution de NaCl sans que l'on puisse, dans un premier temps, préciser l'origine précise de cette source. Il peut s'agir de :

- mélange avec du filtrat de rive du Rhin chargé en Cl dû en partie à l'apport de sels de l'industrie de la potasse,
- dissolution d'évaporites au sein des aquifères tertiaires, jurassiques et triasiques,
- apports superficiels anthropiques (sel de déneigement)
- apport direct de saumures en provenance de l'industrie de la potasse (terrils, bassins de stockage, ...).

L'apport de saumures est probable dans le cas de Bremgarten et les traceurs isotopiques (chap. 3.3) permettront de mieux contraindre les origines de la salinité. Quelques échantillons dans lesquels une composante de filtrat de rive du Rhin a pu être identifiée à l'aide des isotopes stables de l'eau (chap. 3.2) occupent une position intermédiaire entre les eaux bicarbonatées calciques et les eaux chlorurées sodiques (fig. 2). Les eaux du Rhin peuvent, dans ce cas, constituer l'apport principal en chlorures.

Dans le cas de Wolfisheim, les concentrations en chlorures augmentent près de la base du forage à 50 m de profondeur d'un facteur 30 (de 20 à 650 mg/l). Compte tenu de la faible profondeur des eaux, une contamination anthropique ne peut pas être exclue.

(2) Une augmentation des teneurs en chlorures sans que les concentrations en sodium montent de façon concomitante aboutit à un faciès de type Ca-(HCO₃)-Cl dont les eaux de Niederhergheim constituent un exemple. Göppel et Eichinger (1997) ont identifié des eaux de faciès similaire (alcalino-terreux-chloruré) coté badois en particulier dans les zones influencées par des filtrats de rive. On peut attribuer, dans ces cas, l'augmentation des chlorures qui ne dépassent pas des concentrations de 400 mg/l, à un impact anthropique. L'interaction d'eaux chlorurées sodiques avec les silicates de l'aquifère impliquant la néoformation d'argiles riches en Na ou des échanges cationiques sur des argiles peut jouer un rôle dans l'évolution vers un faciès chimique montrant un déficit en Na par rapport aux chlorures.

Les teneurs en **sulfates** restent relativement peu élevées (inférieures à 20% de la somme des anions, voir fig. 2) à l'exception du forage de Heitersheim-Eschbach où les teneurs relatives atteignent 40% et les concentrations absolues 1,4 g/l. Des hypothèses sur leur origine peuvent être avancées sur la base des analyses isotopiques du soufre et de l'oxygène (chap. 3.3.3).

Les teneurs en **nitrate**s dans les eaux de l'aquifère superficiel sont relativement élevées (max. 45 mg/l) mais restent inférieures à la limite de potabilité. Elles diminuent sur les premiers 50 m jusqu'à des valeurs autour de 10 mg/l. Les nitrates constituent le traceur principal de l'impact humain sur la qualité des eaux des forages étudiés et les eaux riches en nitrates contiennent en toute probabilité une composante récente. Pour vérifier cette hypothèse, la distribution des nitrates en fonction de la profondeur a été comparée à celle du tritium (chapitres 3.3.4, 3.4.1).

3.2. ORIGINE DE L'EAU : ISOTOPES STABLES ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$)

Les teneurs isotopiques des précipitations, des eaux superficielles et des eaux souterraines présentent des variations caractéristiques qui peuvent aider à répondre aux questions suivantes :

- **Altitude de la recharge** : les masses de vapeur en provenance de l'océan montent suivant le relief et donnent lieu à des précipitations liées à leur condensation. Ces précipitations seront progressivement appauvries en isotopes lourds en fonction de l'altitude : les valeurs du $\delta^2\text{H}$ et du $\delta^{18}\text{O}$ sont donc plus négatives pour les eaux rechargées à plus haute altitude. Ce gradient varie entre 0,15 ‰ et 0,5 ‰ sur 100 m pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de 1 à 4 ‰ sur 100 m pour le $\delta^2\text{H}$.

- La possibilité d'identifier la contribution des **eaux superficielles** à la nappe par filtration de rive (infiltration à travers la berge) est indirectement liée à l'effet d'altitude. L'altitude moyenne des bassins qui alimentent le Rhin est plus élevée que celle des bassins locaux des affluents en provenance des Vosges et de la Forêt Noire. Les eaux du Rhin sont en conséquence significativement appauvries en isotopes lourds par rapport aux composantes locales de recharge.

- Identification des **eaux "fossiles"** infiltrées lors de périodes climatiques plus froides : les eaux rechargées avant la fin de la dernière glaciation (avant environ 10 000 ans) sont appauvries en isotopes lourds. La distinction de cet effet de température par rapport à un effet d'altitude (filtrat de rive du Rhin) pourra alors se baser sur les teneurs en ^3H et en ^{14}C des eaux.

Dans le diagramme $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (fig. 3), les échantillons s'alignent sur les droites qui représentent les précipitations actuelles, la droite météorique mondiale (Yurtsever et Gat, 1981) :

$$\delta^2\text{H} = 8,2 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10,8$$

ou la droite locale de Karlsruhe

$$\delta^2\text{H} = 7,80 \cdot \delta^{18}\text{O} + 6,45.$$

Il est possible de distinguer deux groupes d'eaux :

Le premier groupe d'échantillons se situe dans un domaine relativement restreint autour de $\delta^{18}\text{O} = -9$ ‰ et $\delta^2\text{H} = -60$ ‰. Leurs teneurs isotopiques sont proches de celles des eaux de source et de rivière des Vosges et de l'Alsace (Garcia, 1986). Il s'agirait donc d'eaux de pluie locales infiltrées. Un échantillon de référence de l'eau de l'Ill a été prélevé à proximité du forage de Hoenheim. Il présente les mêmes caractéristiques isotopiques que celles de l'eau en provenance de la première crépine de cet ouvrage.

Un deuxième groupe d'eaux est nettement plus appauvri en ^{18}O et en deutérium. Il s'agit des échantillons en provenance des forages d'Illkirch, Benfeld, Heitersheim-Eschbach, Bremgarten, Breisach et Balgau.

Ceci est un indice d'une contribution significative des eaux du Rhin. Ce dernier est en partie alimenté par des eaux provenant des contreforts des Alpes. L'appauvrissement est associé au gradient altimétrique et à l'altitude moyenne élevée de son bassin versant. Un effet similaire a été observé pour les eaux en provenance des profondeurs moyennes du

forage de Goldscheuer-Marlen (Göppel et Eichinger, 1997) et d'autres ouvrages de la partie allemande de l'aquifère rhénan. Le fait que l'ensemble des eaux de ce groupe contiennent des teneurs significatives en tritium plaide contre un effet paléoclimatique (recharge sous un climat plus froid que l'actuel) comme explication de l'appauvrissement isotopique. Les temps de résidence apparentes calculés sur la base des activités en ^{14}C restent en outre inférieurs à quelques milliers d'années, ce qui implique leur recharge au cours de l'holocène sous des conditions climatiques similaires à celles de la période actuelle (entre 0 et 10 000 ans).

Le seul cas qui semble équivoque est celui du forage d'Ilkirch. Les eaux profondes de cet ouvrage contiennent une composante jeune qui se mélange avec une composante ancienne d'au moins 2400 à 6000 ans. L'appauvrissement de l'ensemble de ces eaux est due à l'infiltration profonde des eaux du Rhin mais une contribution d'eaux "fossiles" d'âge pléistocène ne peut être exclue avec certitude. La position des points à gauche de la droite météorique pourrait résulter d'un effet paléoclimatique.

La position intermédiaire entre les deux groupes de certaines eaux (Ilkirch à 13-14 m, Heitersheim-Eschbach à 46-51 m) témoigne d'un mélange entre des eaux en provenance du Rhin et la recharge locale.

Compte tenu de la forte variabilité chimique des eaux de filtrat de rive (chap. 3.1), les isotopes stables de l'eau constituent le seul traceur de l'existence d'une contribution d'eau du Rhin et donc d'une vulnérabilité de certains ouvrages à des pollutions accidentelles du fleuve. Ceci doit être relativisé dans la mesure où le temps de transfert du filtrat de rive vers la nappe profonde peut être long, comme l'indiquent les faibles teneurs en ^3H et en ^{14}C du niveau profond du forage d'Ilkirch.

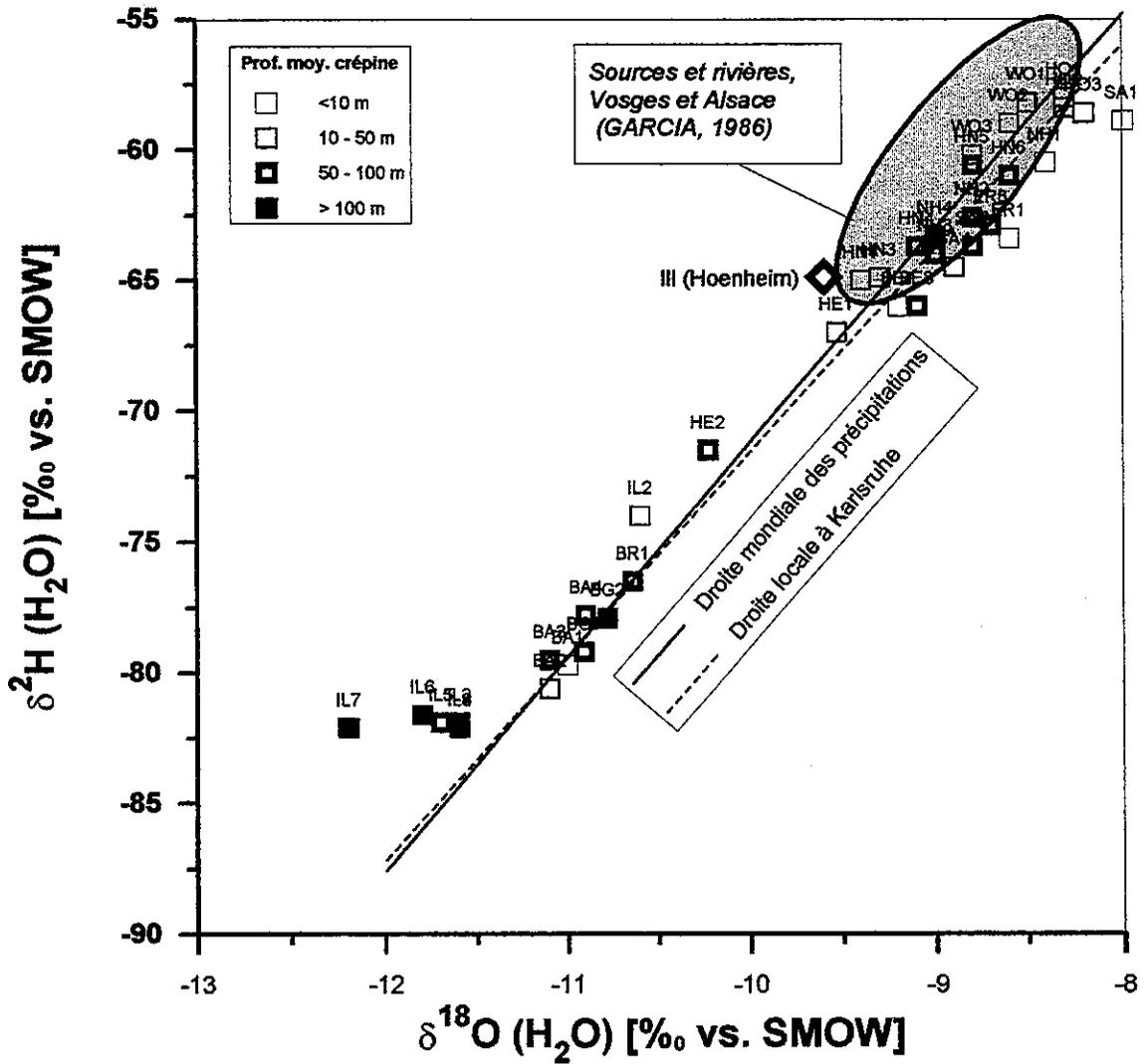


Fig. 3 - Diagramme $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (isotopes stables de l'eau). Eaux des Secteurs étudiés, eau de l'III à Hoenheim, comparaison avec les eaux des sources et eaux superficielles régionales (Garcia, 1986)

3.3. ORIGINE DES ESPECES DISSOUTES

3.3.1. Origine du carbone inorganique dissous dans les eaux et les carbonates

Afin de comprendre les mécanismes d'interaction entre les eaux et les composantes carbonatées de la matrice et afin de mieux contraindre les paramètres d'entrée dans les modèles de datation ^{14}C , des échantillons de carbonates solides et les eaux destinées aux analyses radiocarbone ont été caractérisées isotopiquement.

Les six échantillons de carbonates solides comprennent trois échantillons de gravier de calcaire sain ou altéré du forage de Balgau, un échantillon du ciment carbonaté qui accompagne les graviers et un encroûtement calcitique rencontré à faible profondeur (1m) dans le forage de Niederhergheim sous le sol limoneux.

Les teneurs obtenues dans ces échantillons calcaires se situent entre -3 et +2 ‰ vs. PDB, dans la gamme de $\delta^{13}\text{C}$ typique pour des carbonates marins (fig. 4). Le ciment carbonaté à 102 m de profondeur dans le forage de Balgau est appauvri en ^{13}C et en ^{18}O par rapport aux graviers, signe d'une contribution, lors de la formation du ciment, d'un CO_2 biogénique qui, lui, aurait un $\delta^{13}\text{C}$ encore plus négatif.

L'encroûtement de calcite à Niederhergheim montre le $\delta^{13}\text{C}$ le plus négatif avec -10,3 ‰. Il s'agit de calcite néoformée et on peut supposer qu'elle ait précipité à partir d'une eau isotopiquement semblable aux eaux de recharge locales. Dans la mesure où le forage de Niederhergheim ne semble pas influencé par le filtrat de rive du Rhin, on peut se baser sur une gamme de valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ de -9,5 à -8,5 ‰ vs. SMOW pour l'eau de départ. La composition isotopique de la calcite permet ensuite de conclure sur une température d'environ 10°C pour la précipitation à l'équilibre isotopique avec cette eau.

Le CO_2 du sol impliqué dans la réaction aurait un $\delta^{13}\text{C}$ de -22 à -22,5 ‰. Cette valeur est proche de la moyenne de $-25 \pm 0,3$ ‰ du CO_2 des sols dans le nord de la Suisse (Pearson, 1991) et compatible avec les compositions isotopiques des eaux de la nappe. Nous utiliseront la valeur de -25 ‰, qui peut être considérée comme moyenne régionale sous des sols cultivés comme valeur d'entrée dans les modèles ^{14}C .

Les teneurs isotopiques du carbone inorganique dissous total ($\delta^{13}\text{C}$ du CITD) des eaux de l'aquifère rhénan varient entre -19,9 ‰ (Holtzheim) et -5,7 ‰ (Bremgarten, niveau profond). La figure 5 représente l'effet de la dissolution de la calcite en système ouvert et fermé sur le $\delta^{13}\text{C}$ du CITD en fonction du pH. Afin de modéliser l'évolution isotopique potentielle nous avons choisi la gamme de $\delta^{13}\text{C}_g$ de la phase gazeuse la plus vraisemblable (-25 à -19 ‰ vs. PDB). La courbe de dissolution en système fermé pour $\delta^{13}\text{C}_g = -19$ ‰ constitue une limite supérieure de l'enrichissement du CITD en ^{13}C par simple dissolution. La majorité des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ des échantillons de la nappe se situent en effet au-dessous de cette courbe. Les valeurs plus positives (Bremgarten, Illkirch) ne peuvent s'expliquer que par des $\delta^{13}\text{C}_g$ trop élevés pour être réalistes ou par un mécanisme qui fait évoluer les teneurs isotopiques sans affecter la masse du CITD et le pH. Un tel mécanisme peut être la dissolution incongruente de la matrice carbonatée

(Kloppmann *et al.*, 1998) après que la saturation en calcite soit atteinte. Par ce processus, le $\delta^{13}\text{C}$ du CITD peut s'approcher d'une valeur limite légèrement inférieure à celle de la matrice carbonatée (Wigley, 1976, Pearson, 1991).

On peut en conclure que les eaux, lors de leur recharge dans la zone non saturée, ont été en contact avec un CO_2 du sol avec un $\delta^{13}\text{C}$ à environ -25 à -22 ‰, ce qui est dans la gamme des valeurs rencontrées dans les sols sous culture de plantes du cycle C3 (le cycle photosynthétique de la majorité des plantes cultivées). Les eaux ont ensuite dissous des carbonates, soit en système ouvert soit fermé vis-à-vis du CO_2 du sol. Les eaux profondes de Bremgarten et Illkirch peuvent avoir évolué par "échange isotopique" avec la matrice ce qui indique un temps de contact eau-matrice prolongé.

Les carbonates contenus dans l'aquifère sont d'origine marine (calcaires en provenance des Alpes) et sont cimentés par des calcites isotopiquement plus appauvries ce qui témoigne de la contribution de CO_2 biogénique. Les encroutements proches de la surface ont précipité en équilibre avec les eaux de recharge locale à une température proche de la moyenne annuelle actuelle. Le CO_2 du sol impliqué dans la formation de la calcite aurait un $\delta^{13}\text{C}$ voisin de -22,5 ‰.

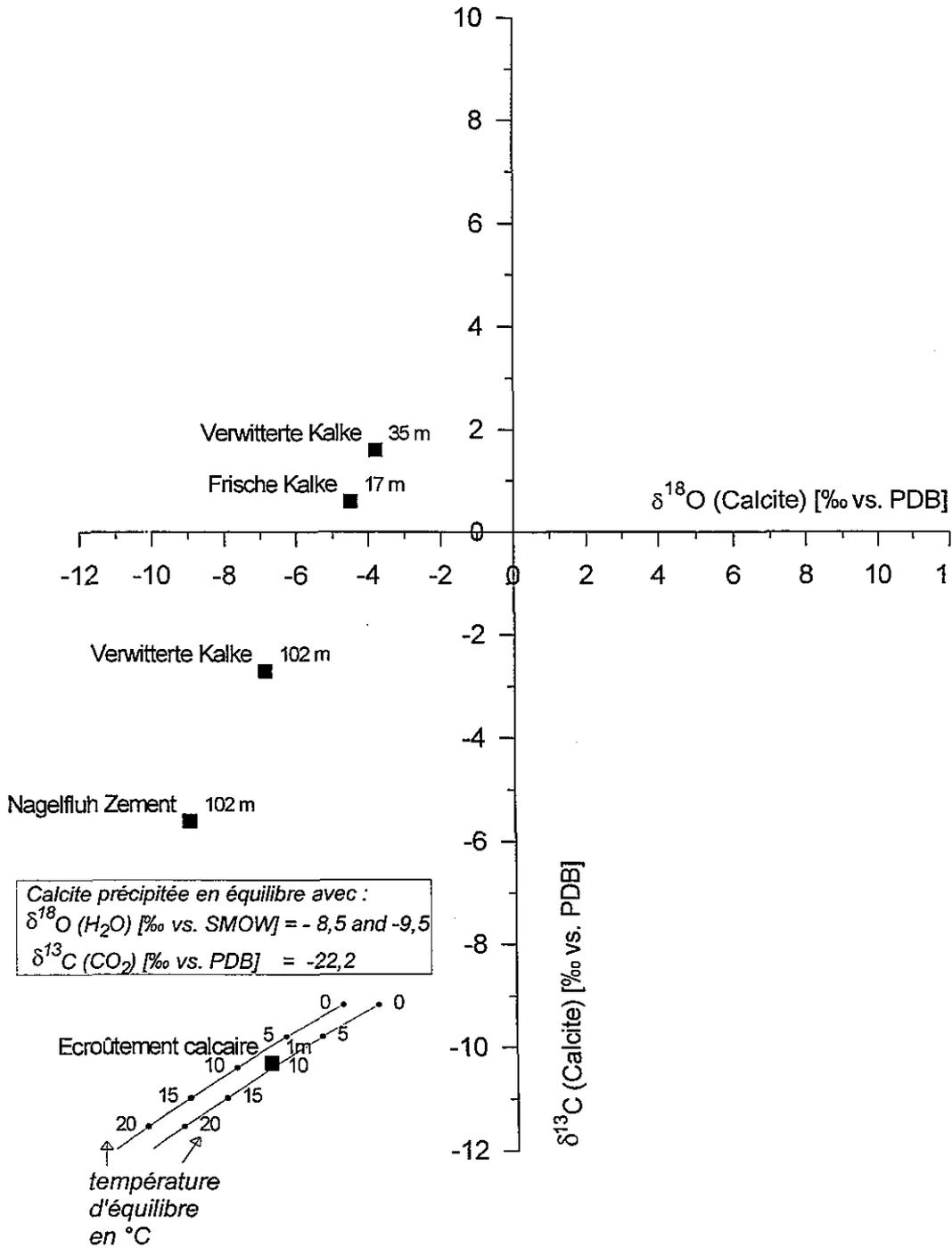


Fig. 4 - Teneurs isotopiques de carbonates issus des forages de Niederhergheim et de Balgau : galets de calcaire, ciment calcitique, néoformations de calcite (encroûtement calcaire dans le forage de Niederhergheim). Les courbes représentent la composition isotopique théorique des calcites précipitées en équilibre avec une eau à $\delta^{18}\text{O}$ entre -9,5 et -8,5 ‰ vs. SMOW à différentes températures qui aurait préalablement dissous un CO_2 du sol de 22,2 ‰ vs. PDB.

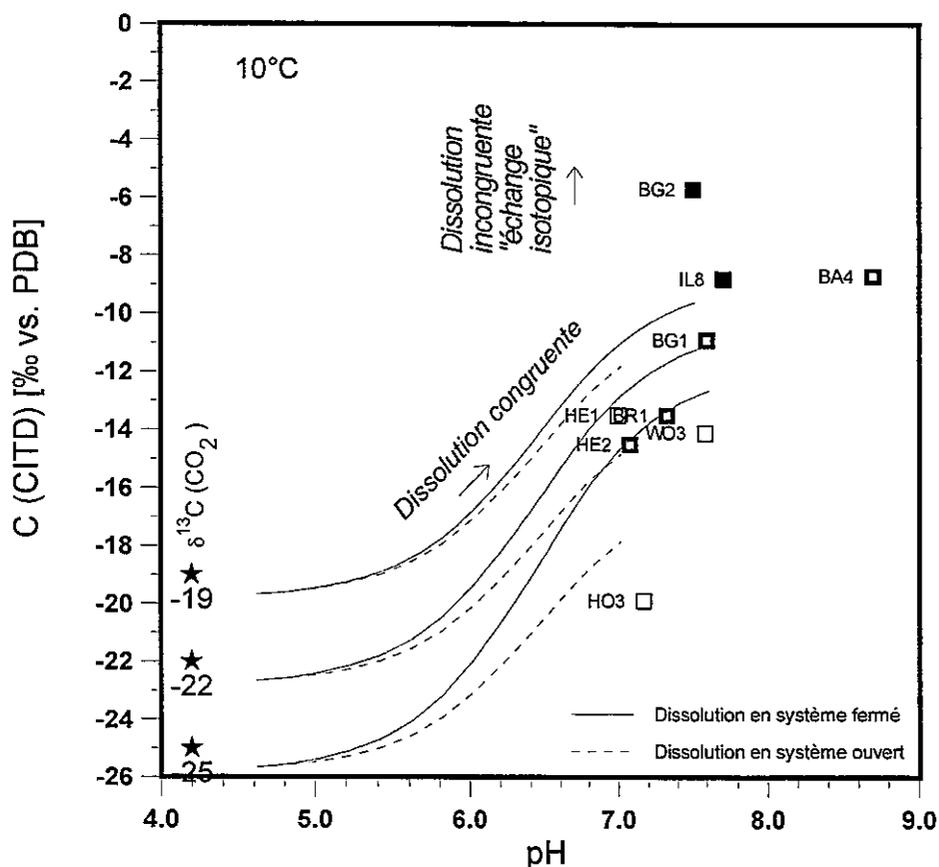


Fig. 5 - $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous vs. pH. L'évolution isotopique par dissolution congruente d'une phase carbonatée a été modélisée (voir Kloppmann et al., 1998) pour les cas d'un système ouvert et fermé vis-à-vis du CO_2 du sol. Les paramètres suivants ont été utilisés : $T = 10^\circ\text{C}$, $p\text{CO}_2 = 10^{-1.5} \text{ atm}$, $\delta^{13}\text{C}$ de la phase gazeuse entre -25‰ et -19‰ vs. PDB, $\delta^{13}\text{C}$ de la phase solide = $+2,2\text{‰}$.

3.2.2. Origine de la salinité

Pour la majorité des ouvrages hors influence des filtrats de rive du Rhin, la chlorinité se situe entre 50 et 100 mg/l sans variations importantes avec la profondeur. Les concentrations autour de 200 mg/l dans le forage d'Illkirch peuvent s'expliquer par l'influence du filtrat de rive souvent caractérisé par des concentrations en chlorures élevées. Dans certains ouvrages on observe de fortes augmentations avec la profondeur même à des profondeurs inférieures à 50 m : à Wolfisheim les concentrations en Cl augmentent d'un facteur 30 de 20 à 650 mg/l entre 32 et 46 m de profondeur. A Balgau, Bremgarten et Heitersheim-Eschbach, les concentrations atteignent respectivement 5,5 g/l, 6,8 g/l et 3,2 g/l. Ces fortes teneurs en chlorures témoignent d'un mélange avec des saumures, d'origine naturelle ou anthropique. Dans le contexte sédimentaire dans lequel on se trouve, il peut s'agir de :

- saumures secondaires issues de dissolution d'évaporites;
- eaux marines connées;
- saumures primaires ayant évolué par évaporation et précipitation d'évaporites à partir d'une eau marine.

Une origine anthropique peut être envisagée dans la mesure où, dans les bassins potassiques alsacien et badois dans le sud de la zone étudiée, l'exploitation de la potasse entraîne une forte pollution de la nappe en chlorures. Les sous-produits d'exploitation sont constitués par des stériles et du chlorure de sodium, déposés en terrils sur les alluvions perméables ou rejetés en rivière jusqu'à 1975; à partir de cette date, un saumoduc a été mis en place pour évacuer le sel des MDPAs vers le Rhin à hauteur de Fessenheim.

La pollution provoquée par la dissolution du sel des terrils par la pluie se traduit en Alsace par deux langues salées débutant dans le bassin potassique à la hauteur de Mulhouse et disparaissant au Nord de Colmar. Cette zone a fait objet d'études détaillées, dans le cadre d'un projet R et D du BRGM qui ont abouti à une modélisation du transport des chlorures dans le secteur français de la nappe (Noyer *et al.* 1998).

Le domaine pollué se prolonge en Allemagne par une zone qui présente également par endroits de fortes concentrations en chlorures, lesquelles proviennent d'anciens bassins de rétention des saumures des MDPAs, installés au voisinage immédiat du Rhin au niveau de Fessenheim ; ces bassins permettaient de procéder à des largages contrôlés dans le Rhin jusqu'en 1976 : de 1957 à 1976 de l'ordre de 1 million de tonnes de sel seraient ainsi parvenues à la nappe. La nappe est aussi polluée côté allemand, mais dans une moindre mesure, du fait de bassins de rétention installés côté allemand et qui auraient infiltré environ 10 000 tonnes de sel, et de 2 terrils près de petits sites miniers en bordure de la Forêt Noire. Vers Breisach, en bordure de la zone (latitude de Colmar), la salure a atteint des puits AEP et des études hydrodynamiques sont prévues.

Afin d'étudier plus en détail l'origine de la salinité dans le secteur de Bremgarten/Heitersheim/Breisach, des analyses des concentrations en bromures et des isotopes du bore et du soufre (chap. 3.2.3) ont été effectuées.

Rapports Cl/Br

Les saumures primaires (issues d'évaporation d'eau de mer) se caractérisent par un rapport Cl/Br inférieur ou égal à celui de l'eau de mer (qui est de l'ordre de 290 exprimé en mg/mg). Les chlorures sont, en fait, préférentiellement intégrés dans la phase solide (à partir du stade de précipitation de la halite) ce qui provoque l'enrichissement du Br dans la phase liquide résiduelle. Les évaporites, quant à elles, sont appauvries en Br par rapport aux saumures résiduelles et leur dissolution donne donc lieu à des eaux salées qui ont, en conséquence, des rapports Cl/Br supérieurs à celui de l'eau marine.

L'augmentation des teneurs en Cl au sein du même forage est très importante dans un certain nombre de cas (fig. 6), en particulier pour Wolfisheim (facteur 30), Bremgarten (facteur 35) et Balgau (facteur 130). L'ensemble des eaux du côté allemand du secteur de Breisach a un rapport Cl/Br (fig. 7) supérieur à celui de l'eau de mer, les eaux très salées de Heitersheim-Eschbach et de Bremgarten (niveau inférieur) atteignent des valeurs >1000. Le rapport le moins élevé est celui du niveau moyen de Bremgarten (497 mg/mg). Toutes les eaux du secteur portent donc la signature d'une dissolution d'évaporites ce qui nous permet d'exclure l'hypothèse d'un mélange avec des eaux marines connées ou des saumures évaporitiques résiduelles.

Le comportement du bore est analogue à celui du brome et cet élément n'est intégrée dans la phase solide qu'à partir d'un degré d'évaporation correspondant à la précipitation de sulfates de magnésium et de potassium. Les rapports Cl/B très supérieurs à la valeur marine de 4300 (mg/mg) suggèrent la même conclusion que les rapports Cl/Br.

Teneurs isotopiques des sulfates

Les teneurs isotopiques des sulfates ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{34}\text{S}$, voir chap. 3.2.3. pour une discussion détaillée) placent les eaux salines profondes de Heitersheim et de Bremgarten dans le domaine des sulfates évaporitiques mais ne permettent pas de différencier entre les deux forages. Elles démontrent par contre l'origine distincte des sulfates dans les niveaux peu profonds de Bremgarten et dans le forage de Breisach.

Teneurs isotopiques du bore

Les isotopes du bore constituent un traceur potentiel de l'origine de la salinité dans les eaux souterraines dans différents contextes géologiques (aquifères côtiers, Casanova *et al.*, 1999, socle profond, Negrel *et al.*, 1999, bassins sédimentaires, Kloppmann *et al.*, 1999). Ils sont particulièrement utiles quand il s'agit de distinguer entre une origine marine ou non marine des sels dissous (voir par exemple Vengosh *et al.*, 1991 a,b ou Bottomley *et al.*, 1994). Le bore se distingue comme traceur dans l'eau souterraine par

- sa forte solubilité,
- son omniprésence dans le milieu aquatique,
- l'absence d'effets isotopiques des processus comme l'évaporation (qui affecte les isotopes stables de l'eau) ou des réactions redox qui affectent les teneurs isotopiques des sulfates.

Les isotopes du bore sont, par contre, sensibles au pH, qui modifie la répartition entre les espèces dominantes d'acide borique ($B(OH)_3^0$) et de borate ($B(OH)_4^-$) et aux processus d'adsorption/désorption sur les argiles.

Certains polluants comme les engrais, les eaux usées et les cendres se caractérisent par des teneurs isotopiques particulières du bore (voir le résumé de Vengosh, 1998) qui a été utilisé comme traceur dans le contexte de la caractérisation des pollutions agricoles (Leehouts *et al.*, 1998).

Les teneurs isotopiques du bore dans les eaux du secteur de Breisach (fig. 8) couvrent une très large gamme de valeurs entre +5,1 et +57,1 ‰. Ce contraste de 52 ‰ a été observé au sein du même site à Bremgarten entre le niveau moyen et le niveau profond et cela malgré un contraste de concentrations en bore très faible (35 et 52 µg/l). La valeur de 57,1 ‰ est parmi les plus élevées qui aient été mesurées dans la nature. C'est dans des milieux évaporitiques extrêmes tels que la Mer Morte (valeur maximale de 57,3 ‰, Vengosh *et al.*, 1991a) et dans les lac des sels de l'Australie (valeur maximale de 59,2 ‰, Vengosh *et al.*, 1991b) que des valeurs nettement supérieures à 50 ‰ ont été décrites. Dans les deux cas, le bore est d'origine marine. On explique l'enrichissement considérable des eaux en ^{11}B par rapport à l'eau de mer, qui a un $\delta^{11}B$ de 40 ‰, comme le résultat d'une adsorption du bore sur des argiles. Cette adsorption est sélective et la fraction du bore adsorbé aura un $\delta^{11}B$ inférieur à la solution de départ. Le bore résiduel en solution est donc enrichi en ^{11}B ce qui augmente son $\delta^{11}B$. Ce mécanisme ne peut cependant avoir une influence sur la composition isotopique du bore en solution que dans le cas de rapports volumiques eau-roche très faible. Ni la condition d'une présence significative d'argiles, ni celle de rapports eau-roche peu élevés, ne sont remplies dans le cas du secteur de Breisach.

Une autre possibilité de faire évoluer des solutions marines au-delà de 50 ‰ est l'évaporation quasi-totale de l'eau de mer jusqu'à la précipitation de sels potassiques (K-Mg-sulfates) comme le montrent les études expérimentales de Vengosh *et al.* (1992). Dans le cas de Bremgarten, les rapports Cl/Br élevés excluent la présence de saumures primaires issues de l'évaporation d'eau de mer. La valeur maximale des sels potassomagnésiens qui précipitent de ces solutions marines très évoluées se situe autour de 36 ‰ ce qui est trop bas pour expliquer la valeur observée du forage de Bremgarten.

On pourrait supposer, en partant de l'hypothèse d'une origine anthropique des sels, que les procédés d'extraction du sel potassique ou les conditions de dépôt des stériles favorisent un fractionnement du bore et un enrichissement du ^{11}B dans les solutions infiltrées. Dans ce cas, les isotopes du bore constitueraient un traceur idéal de ce type de pollution qui se distinguerait très clairement des sources de salinité naturelles potentielles. Afin de vérifier cette hypothèse il serait nécessaire de caractériser :

- les sels des stériles,
- et les solutions infiltrantes (base des terrils ou solutions des saumoducs)

sur le plan isotopique. Il serait également souhaitable d'évaluer de façon théorique les fractionnements isotopiques potentiels au cours des procédés d'extraction et du traitement du sel potassique.

La situation est très différente pour les deux niveaux de Heitersheim-Eschbach (46-51 et 64-91 m) : les concentrations en chlorures et en bore augmentent également en profondeur mais le $\delta^{11}\text{B}$ diminue. La salinité en profondeur a une autre origine dans le cas de Bremgarten. La valeur de 15 ‰ n'est pas incompatible avec une origine marine : le bore intégré dans la halite précipité lors de l'évaporation de l'eau de mer se situe à environ 13 ‰ (voir figure 9).

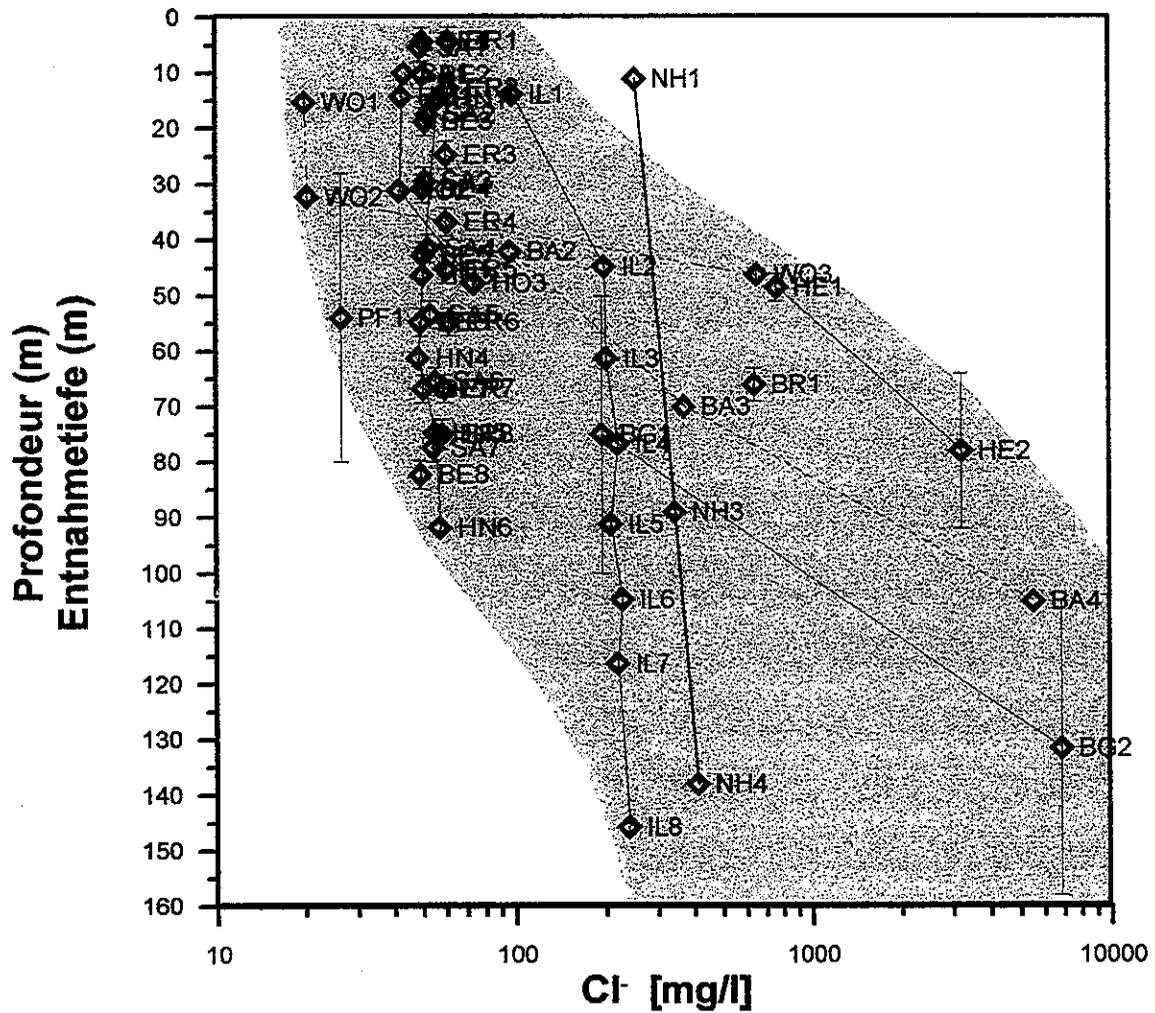


Fig. 6 - Répartition des teneurs en chlorures avec la profondeur dans les Secteurs étudiés de l'aquifère rhénan.

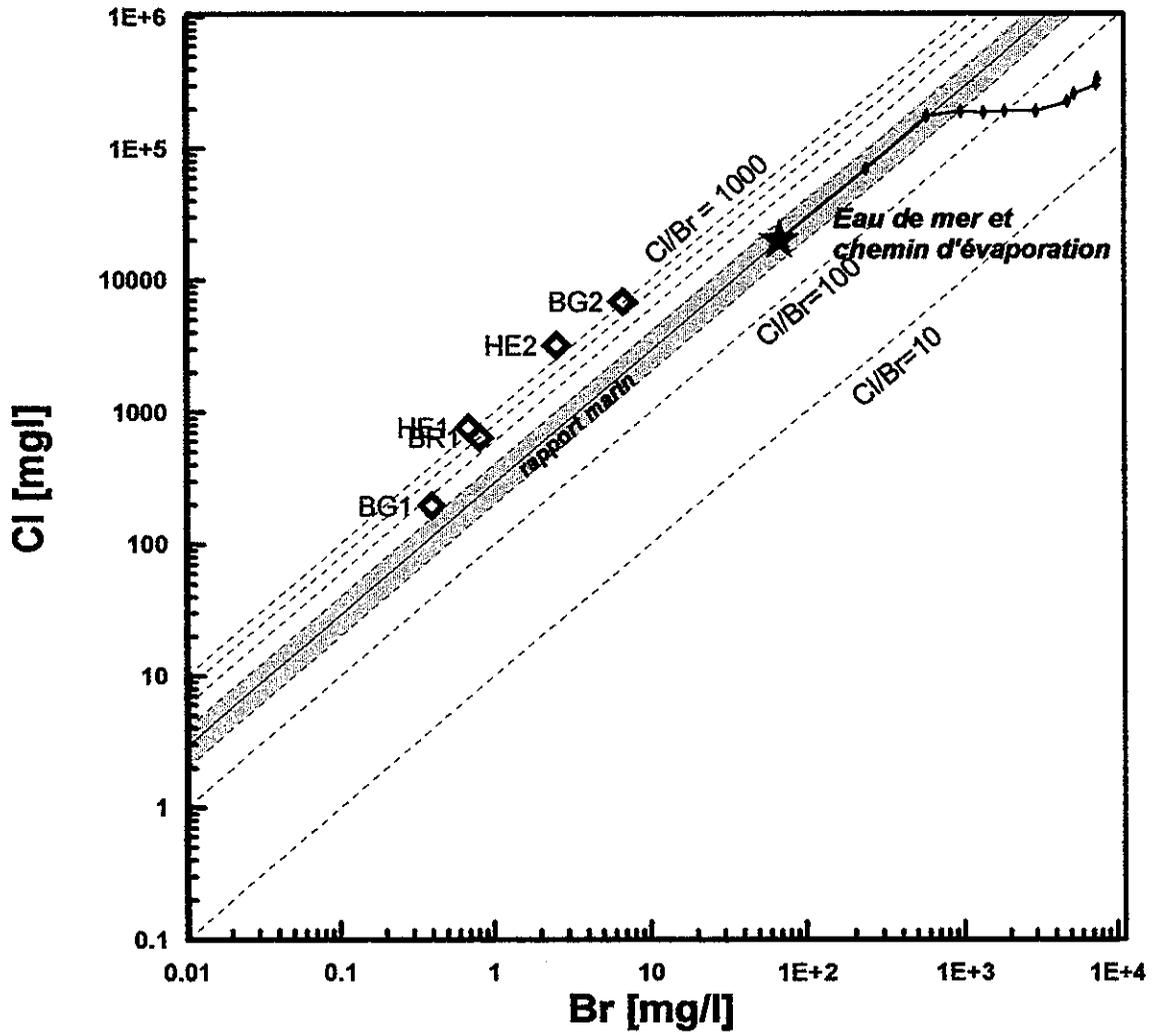


Fig. 7 - Teneurs en Cl vs. Br pour les forages du coté allemand du Secteur de Breisach.

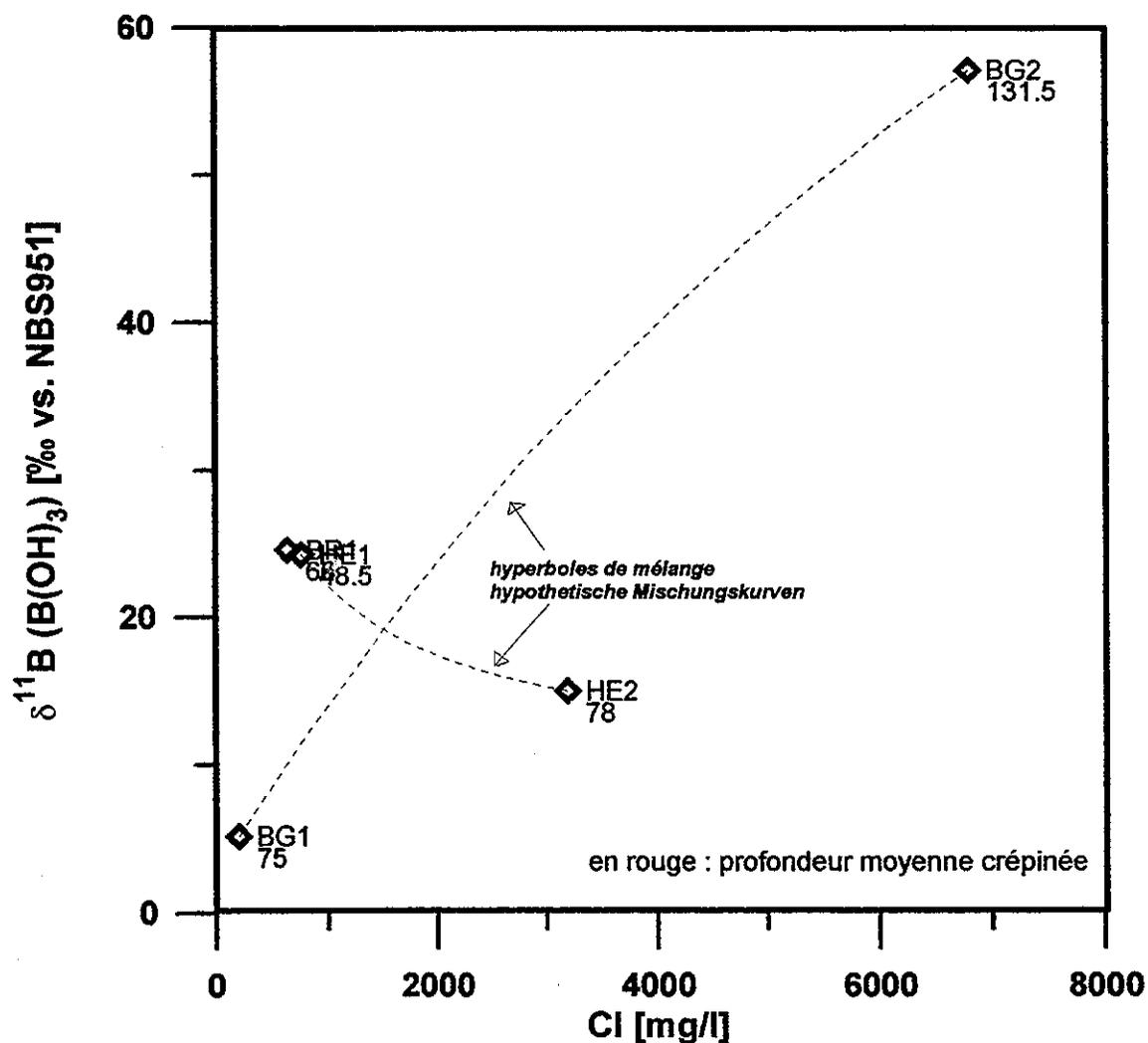


Fig. 8 - $\delta^{11}\text{B}$ vs. Cl pour les forages du secteur Breisach. Des hyperboles de mélange ont été calculées pour les différents niveaux de Heitersheim-Eschbach et de Bremgarten.

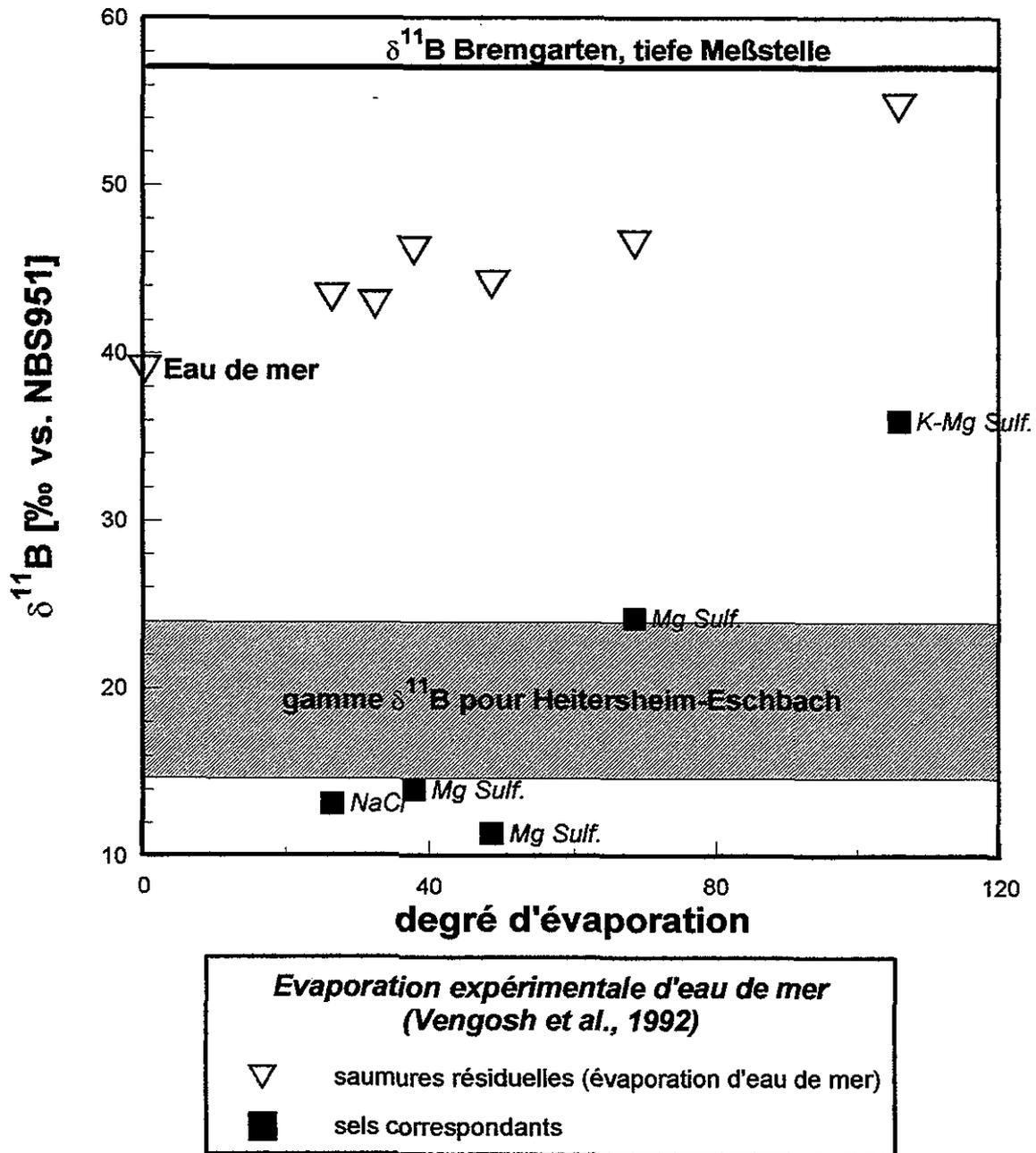


Fig. 9 - Situation des valeurs de δ¹¹B de Heitersheim-Eschbach et Bremgarten (niveau profond) par rapport aux sels et saumures résiduelles issues de l'évaporation de l'eau de mer (Vengosh et al., 1992)

3.3.3. Origine des sulfates dissous : isotopes du soufre et de l'oxygène ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}$)

L'étude isotopique du sulfate dissous peut mettre en évidence différents processus biogéochimiques au sein de la nappe :

- l'oxydation des sulfures ou du soufre d'origine organique,
- la réduction bactérienne sulfates dissous,
- la dissolution d'évaporites (gypse ou anhydrite) : comme les teneurs isotopiques des séries évaporitiques varient en fonction de l'âge de la formation, on peut obtenir des informations sur le type de sulfates avec lesquels l'eau a été en contact,
- la précipitation de minéraux sulfatés,
- la mise en solution de fumées ou aérosols industriels.

La grande majorité des eaux de l'aquifère se situent dans une gamme de concentration en sulfates restreinte entre 20 et 50 mg/l et l'on observe peu de variations avec la profondeur (fig. 10). Les forages de Hoenheim, de Bremgarten et de Heitersheim-Eschbach font exception. Dans le premier cas on observe une nette diminution des teneurs en sulfates avec la profondeur jusqu'à des concentrations inférieures à 2 mg/l. On peut donc supposer une réduction des sulfates dans la partie profonde de l'aquifère. Les eaux de Heitersheim-Eschbach sont très chargées en sulfates (857 et 1410 mg/l) et comme dans le cas de Bremgarten (145,5 mg/l), les concentrations augmentent avec la profondeur.

La position des points dans un diagramme $\delta^{34}\text{S}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ des sulfates (fig. 11) suggère la contribution de différentes sources de sulfates. Les eaux sulfatées-calciques-magnésiennes de Heitersheim-Eschbach et les eaux d'Ilkirch, Bremgarten se situent dans le domaine des sulfates solides d'origine marine. L'existence de niveaux évaporitiques dans les sédiments du Fossé rhénan rend plausible un apport de sulfates par dissolution de gypse ou d'anhydrite. Les sulfates de Bremgarten (niveau inférieur) et de Heitersheim-Eschbach sont isotopiquement très proches. Les teneurs en sulfates du forage de Heitersheim peuvent être attribués à la dissolution des gypses contenues dans les marnes argileuses tertiaires des couches de Pechelbronn. Ceux d'Ilkirch sont plus enrichis en ^{34}S et proches des évaporites du Muschelkalk ou du Jurassique supérieur. On n'observe pas de diminution des teneurs en sulfates avec la profondeur dans le cas d'Ilkirch, une réduction significative des sulfates qui pourrait enrichir isotopiquement la fraction restante est donc peu probable.

Les sulfates de l'échantillon de Wolfisheim, Sand, Breisach, Bremgarten (niveau moyen) et Balgau-Fessenheim sont appauvris en ^{34}S et ^{18}O par rapport au domaine des évaporites mésozoïques. Les concentrations relativement peu élevées de ces eaux (20 à 40 mg/l) proviendraient d'une source différente : des entrées atmosphériques ou d'une oxydation de sulfures ou de soufre organique.

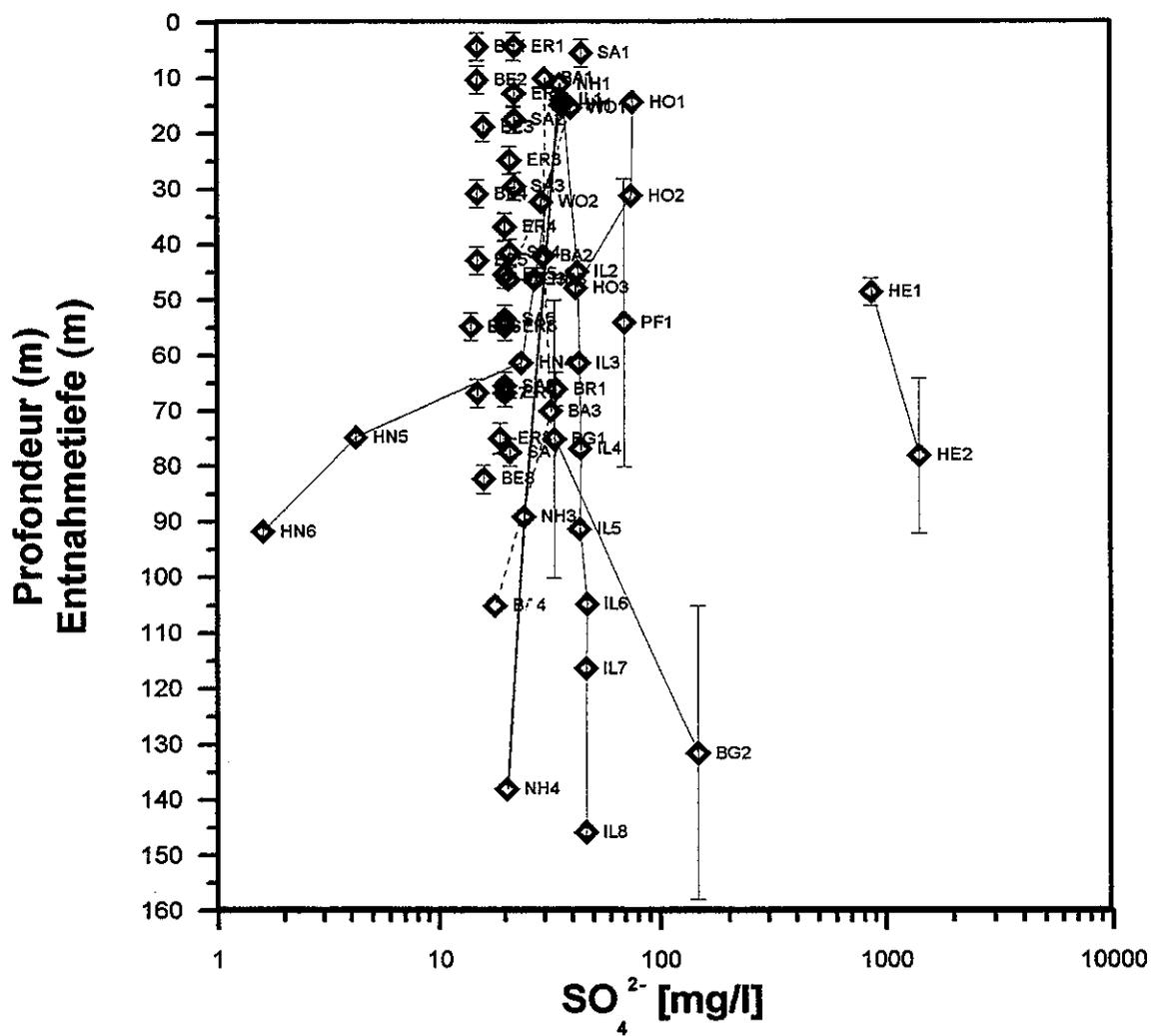


Fig. 10 - Répartition des teneurs en sulfates avec la profondeur dans Les Secteurs étudiés de l'aquifère rhénan.

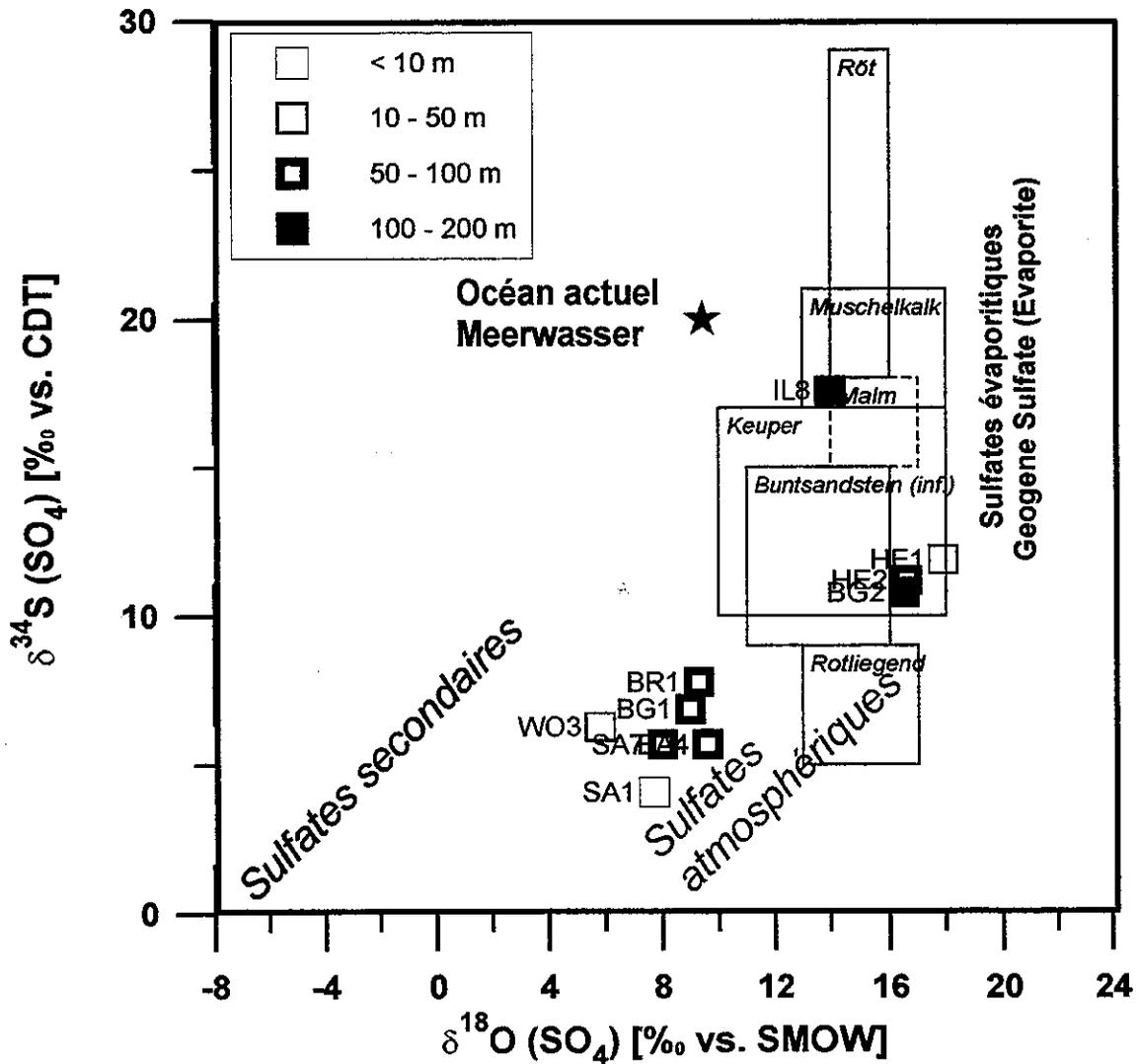


Fig. 11 - Digramme $\delta^{34}\text{S}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (isotopes stables des sulfates dissous) pour les eaux de l'aquifère rhénan. Domaines des sulfates évaporitiques d'après Balderer et al. (1991).

3.3.4. Pénétration des nitrates dans la nappe

Les teneurs maximales de 45 mg/l en nitrates (forage de Sand) observées dans la nappe peu profonde des secteurs étudiés atteignent presque la limite de potabilité fixée à 50 mg/l. On observe une tendance générale à la diminution des concentrations avec la profondeur (fig. 12) mais les eaux profondes peuvent contenir des concentrations significatives en nitrates (jusqu'à 13 mg/l en dessous de 100 m dans le cas de Niederhergheim). Seulement deux échantillons ont des teneurs proches de la limite de détection (<0,1 mg/l), ceux des niveaux profonds de Hoenheim et de Bremgarten. Dans le premier cas, les teneurs très basses en oxygène dissous indiquent un milieu réducteur qui pourrait favoriser l'élimination des nitrates par réduction bactérienne (dénitrification). Dans le cas de Bremgarten, les conditions sont plutôt oxydantes et les basses teneurs en nitrates seraient donc dues à des eaux peu nitratées à l'origine.

La tendance à la diminution avec la profondeur doit être interprétée comme le résultat d'un mélange entre des eaux récentes contenant des concentrations significatives en nitrates et des eaux plus anciennes dépourvues de nitrates ou faiblement nitratées.

Il faut donc conclure que le transfert rapide de polluants sur toute l'épaisseur de la nappe est possible et que la nappe profonde, vu les conditions généralement oxydantes, n'a pas la capacité d'éliminer les nitrates par des processus naturels de réduction (dénitrification).

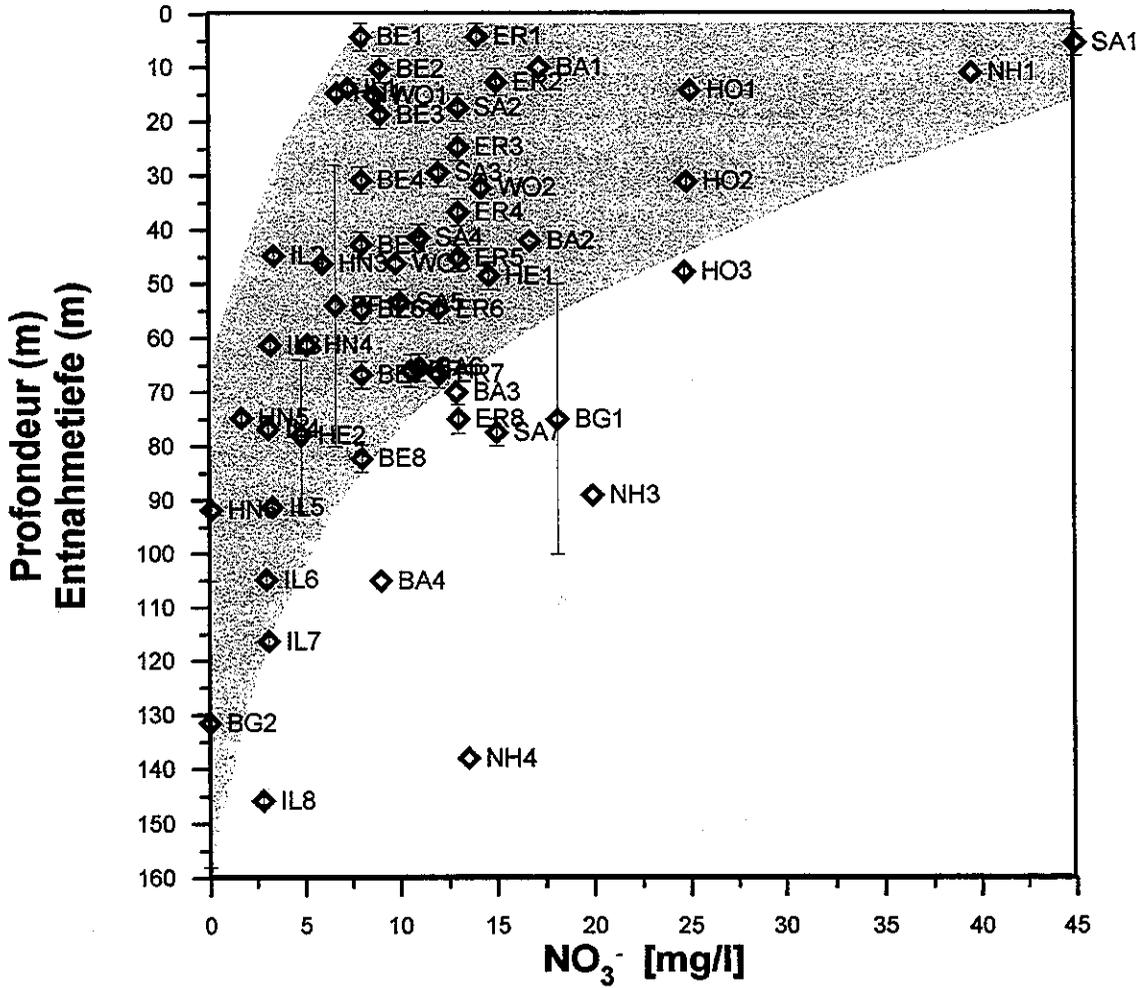


Fig. 12 - Répartition des teneurs en nitrates avec la profondeur dans le secteur de Strasbourg

3.3.5. Pollutions par des contaminants organiques

Les teneurs en herbicides (triazines) et en composants organiques volatils dans les ouvrages prélevés du secteur de Strasbourg restent dans la très grande majorité en dessous du seuil de détection (5 µg/l pour les COV et 0,05 µg/l pour les triazines).

Le secteur de Benfeld est atteint d'une contamination aux solvants organochlorés volatils, en particulier au tétrachloro-méthane, détecté en 1992 dans un puits d'eau potable à Erstein (EAT, 1998). Des recherches ont montré que cette pollution pourrait avoir été engendrée par le renversement d'un camion-citerne transportant du tétrachlorure de carbone en 1970 à Benfeld.

Les analyses d'eau et de sol lors du forage du piézomètre multi-crépiné de Benfeld (EAT 1997) ont montré des fortes teneurs en tétrachloro-méthane (concentrations maximales de 0,05 mg/kg pour le sol et de 580 µg/l pour l'eau) et également des concentrations élevées en trichloro-méthane et en tétrachloro-éthylène dans l'eau. Les eaux des différents niveaux du piézomètre prélevées lors de la foration montrent un fort contraste dans leur chimisme en particulier pour les nitrates (112 mg/l en surface, 9 mg/l à 74 m) les sulfates et le potassium.

Les analyses des prélèvements postérieurs à l'installation du tubage (tableau 5) montrent une colonne d'eau beaucoup plus homogène. Les concentrations en nitrates, à titre d'exemple, ne s'élèvent en surface qu'à 8 mg/l et restent constantes sur toute la profondeur du forage. Les concentrations en COV restent en dessous de la limite de détection. Les analyses isotopiques (chap. 3.4.1 et tab. 6) confirment l'homogénéité apparente de la colonne d'eau. La comparaison des analyses avant et après installation du tubage pourrait mener à l'hypothèse qu'un seul niveau près de la base du piézomètre soit réellement productif. L'homogénéité chimique est similaire pour le forage d'Erstein et les COV restent peu élevés ($\Sigma\text{COV} < 2 \mu\text{g/l}$). Le contraste chimique est beaucoup plus prononcé dans le cas du forage de Sand où les nitrates diminuent de 45 à 12 mg/l avec la profondeur. Le tritium est, par contre, constant à 14-17 UT, il s'agit donc d'eaux récentes. Pour Sand les teneurs en tétrachloro-méthane sont élevées et varient de 29 µg/l en surface jusqu'à 4,9 µg/l à 80 m.

Il semble probable que les analyses, au moins pour le forage de Benfeld, ne soient pas représentatives de la profondeur de prélèvement et ceci pourrait être dû aux difficultés rencontrées au cours du forage, les différentes interventions sur le forage entraînant une homogénéisation locale de la colonne d'eau. On peut également envisager l'existence d'un court-circuit hydraulique au sein du forage entraînant une production préférentielle d'un niveau profond.

3.4. TEMPS DE RESIDENCE DE L'EAU

3.4.1 Teneurs en tritium

Isotope radioactif de l'hydrogène, le tritium est naturellement présent dans la molécule d'eau à de très faibles concentrations. Son temps de demi-vie de 12,43 ans le prédestine pour dater ou tracer des cycles hydrologiques courts (1 à 100 ans). A sa production naturelle s'ajoute une injection de tritium en grande quantité lors des essais thermonucléaires aériens dès les années 50. Depuis l'arrêt des essais, les teneurs en ^3H dans les précipitations décroissent progressivement et tendent actuellement vers les teneurs naturelles. La présence de tritium dans les eaux souterraines permet d'identifier et de "dater" des eaux relativement jeunes (temps de résidence de l'ordre de la dizaine d'années).

La distribution des teneurs en tritium en fonction de la profondeur (fig. 13) est similaire à celle des nitrates. Le diagramme 3D représentant NO_3 et ^3H vs. profondeur (fig. 14) montre la diminution parallèle des deux paramètres jusqu'à des valeurs inférieures à 5 mg/l et 5 UT.

Par leurs teneurs en tritium, on peut distinguer trois groupes d'eaux :

- Eaux "anciennes" infiltrées avant 1952, date des premiers essais thermonucléaires. Les teneurs en tritium sont dans ce cas aujourd'hui inférieures à la limite de détection. Il convient de noter qu'aucune des eaux analysées n'appartient à ce groupe et que même les eaux prélevées à des profondeurs supérieures à 120 m contiennent des teneurs mesurables en tritium (3 ± 1 UT dans le cas d'Illkirch). Des eaux tritiées profondes peuvent signaler des courts-circuits hydrauliques au niveau du forage notamment si le prélèvement est effectué après de longues périodes de non-exploitation (Göppel et Eichinger, 1997), ce qui est le cas pour le forage multi-crépiné d'Illkirch. Pour les piézomètres de Niederhergheim et de Bremgarten on peut néanmoins écarter cette hypothèse dans la mesure où il s'agit d'ouvrages récents, multi-tubes, échantillonnés peu après leur foration.
- Les eaux avec des teneurs comprises entre la limite de détection et environ 15 à 20 UT contiennent une composante récente infiltrée depuis 1952 qui peut être mélangée avec une composante plus ancienne (pré-1952). La plupart des eaux analysées appartiennent à cette catégorie.

L'eau de l'Ill à Hoenheim a une teneur en tritium de 18 UT et elle est représentative des précipitations actuelles sur son bassin versant.

- Les eaux dont les teneurs en ^3H sont comprises entre 25 et 35 UT peuvent être considérées comme récentes et contiennent une composante "thermonucléaire". Les eaux de Wolfisheim appartiennent à cette catégorie, même l'eau fortement saline de la base du forage. Il est donc peu probable que la salinisation soit due à une remontée d'eaux anciennes profondes du type Na-Cl.

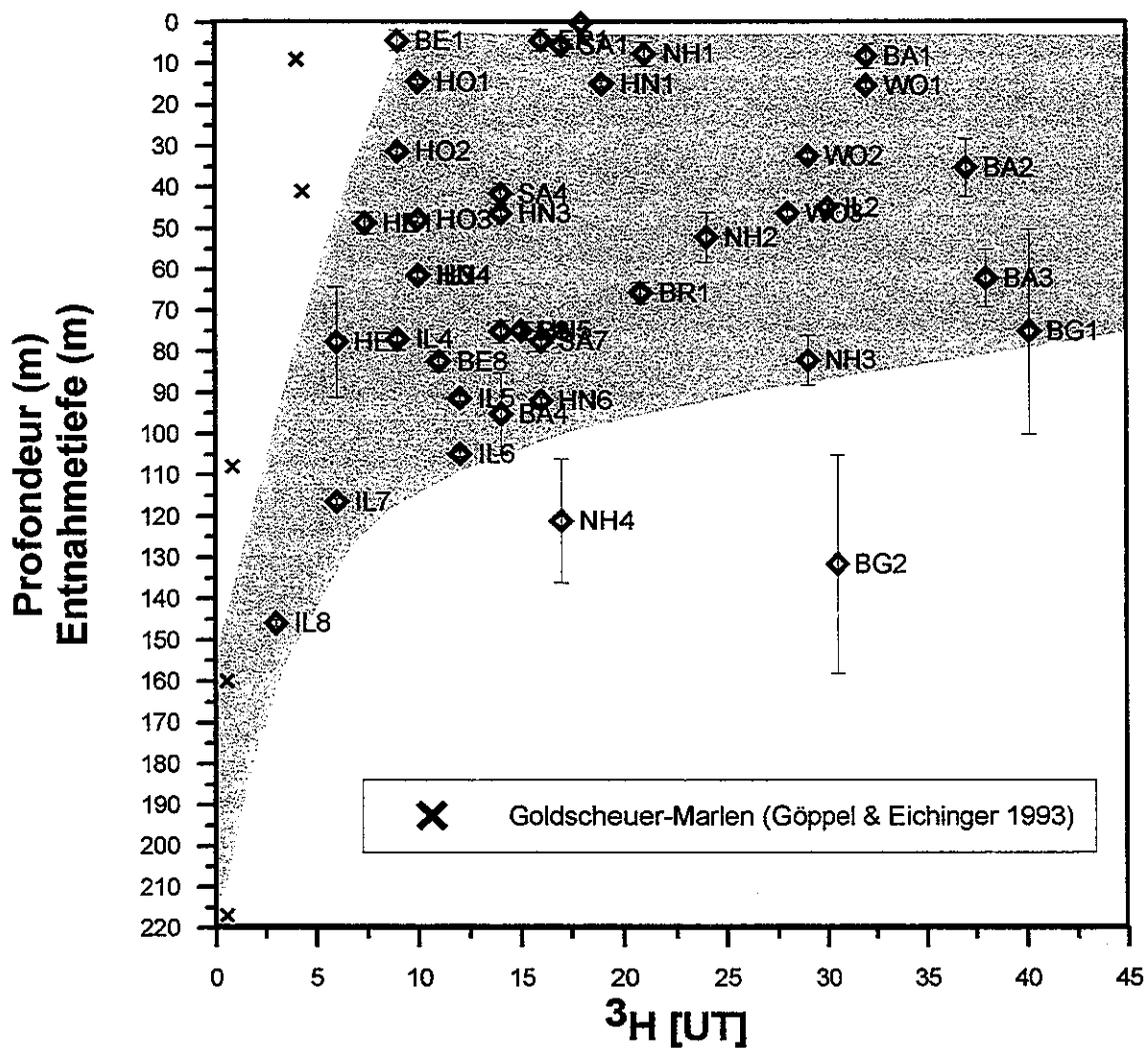


Fig. 13 - Répartition des teneurs en tritium avec la profondeur

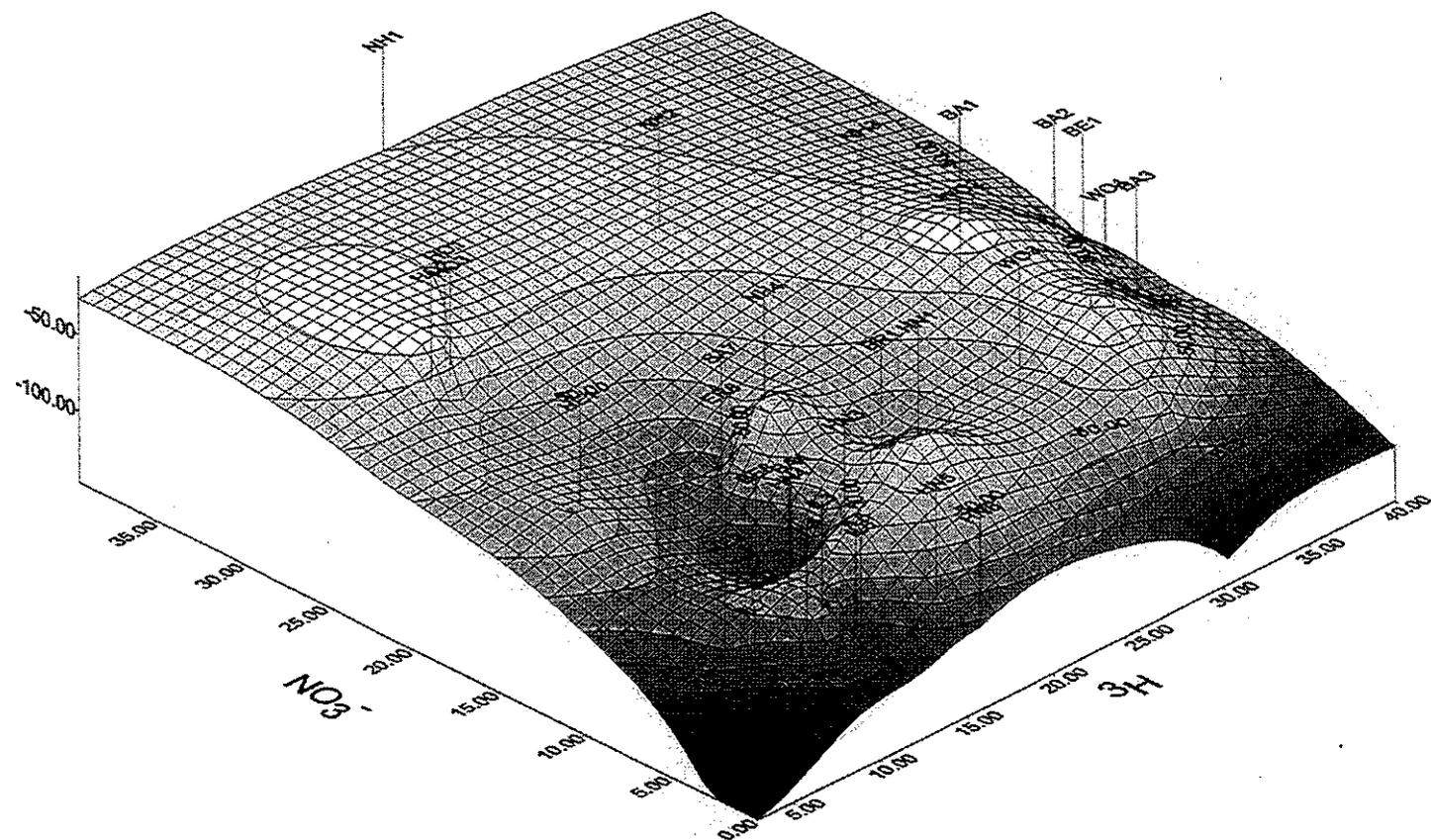


Fig. 14 - Diagramme teneurs en ^3H et en Nitrates en fonction de la profondeur. Eaux de l'aquifère rhénan dans le secteur de Strasbourg.

3.4.2. Estimation des temps de résidence sur la base de l'activité en ^{14}C

Le traçage et la datation des eaux par les isotopes du carbone est basé sur la détermination de la teneur en carbone-13 et de l'activité en carbone-14 du carbone inorganique total dissous (CITD). Le ^{13}C sert à connaître le mode d'introduction du carbone dans l'hydrosphère et le ^{14}C permet ensuite, de par sa décroissance radioactive, de déterminer le temps au cours duquel les espèces du carbone inorganique ont été isolées de l'atmosphère.

Le ^{14}C est un isotope radioactif qui décroît avec un temps de demi-vie de 5730 ans. Il peut servir de chronomètre pour des temps de résidence de l'eau dans l'aquifère allant de l'actuel à 45 000 ans au maximum. Son utilisation comme outil de datation nécessite des connaissances précises sur le fonctionnement hydrochimique de la nappe, en particulier sur les interactions avec une matrice carbonatée, donc des modélisations géochimiques basées sur le ^{13}C et les espèces calco-carboniques.

Les valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ et les activités en ^{14}C montrent une certaine tendance à une corrélation inverse (Fig. 15) similaire à celle observée pour les eaux de Goldscheuer-Marlen (Göppel et Eichinger, 1997). Cette tendance peut être interprétée comme le résultat d'une interaction entre l'eau et les carbonates solides de l'aquifère. L'eau infiltrante a une activité en ^{14}C supérieure ou égale à 100 % et un $\delta^{13}\text{C}$ autour de -25 ‰ dans le cas où la végétation appartient au cycle C3. La dissolution d'une matrice carbonatée d'origine marine ($A^{14}\text{C} = 0\%$, $\delta^{13}\text{C}$ proche de 0 ‰) en système fermé vis-à-vis du CO_2 du sol entraînerait un enrichissement en ^{13}C et une diminution de l'activité en ^{14}C . La valeur élevée du $\delta^{13}\text{C}$ des échantillons profonds d'Ilkirsch (145-146 m) et de Bremgarten (105-158 m) laisse supposer un « échange isotopique » avec la matrice qui peut être assimilé à une dissolution incongruente (Pearson, 1991).

Un certain nombre de modèles chimiques et isotopiques de datation ont été développés pour corriger la contribution du carbone de la matrice. Wigley (1975) montre que la distinction entre une dissolution de carbonates en système fermé vis-à-vis du CO_2 du sol de celle en système initialement ouvert peut être décisive pour la datation des eaux en milieu carbonaté. On utilise ici deux modèles basés sur la teneur en ^{13}C , le modèle d'Ingerson et Pearson (1964) et celui de l'AIEA (Salem *et al.*, 1980). Le premier prend en compte la dissolution de carbonate en système fermé, le deuxième en système initialement ouvert. Les calculs se basent sur les paramètres d'entrée suivants :

- $\delta^{13}\text{C}$ de la phase gazeuse = -25 ‰
- $\delta^{13}\text{C}$ de la phase solide = 0 ‰ (moyenne des graviers carbonatés)
- $\delta^{13}\text{C}$ mesuré de l'eau
- activité ^{14}C de la phase gazeuse = 100 % carbone moderne (cm)
- activité ^{14}C de la phase solide = 0 % cm
- activité ^{14}C mesurée de l'eau

Le tableau 8 donne les "âges" ^{14}C calculés qui sont en général plus élevés pour le modèle de dissolution en système initialement ouvert. Il s'avère nécessaire de considérer les possibilités de mélange d'eaux de provenance et de temps de résidence différents. Les isotopes stables de l'eau et les teneurs en tritium indiquent qu'aucune des eaux analysées n'est exempte d'une composante "jeune" et que, dans un certain nombre de cas, l'eau du Rhin contribue significativement *via* la filtration de rive. Les "âges" calculés représentent donc des âges mixtes que l'on peut interpréter comme temps de résidence minimal de la composante "ancienne". Les eaux qui contiennent probablement une telle composante sont celles des niveaux les plus profonds de Heitersheim-Eschbach, d'Illkirch et de Holtzheim. Aucun des "âges" calculés permet d'identifier avec certitude une contribution d'eaux antérieures à l'holocène (>10 000 ans). Il est intéressant de noter que les eaux profondes d'Illkirch contiennent manifestement des eaux "anciennes du Rhin" : les isotopes stables de l'eau montrent qu'il s'agit d'un filtrat de rive (filtration par les berges du Rhin), le tritium est proche de la limite de détection et les temps de résidence calculés sont de l'ordre de quelques milliers d'années.

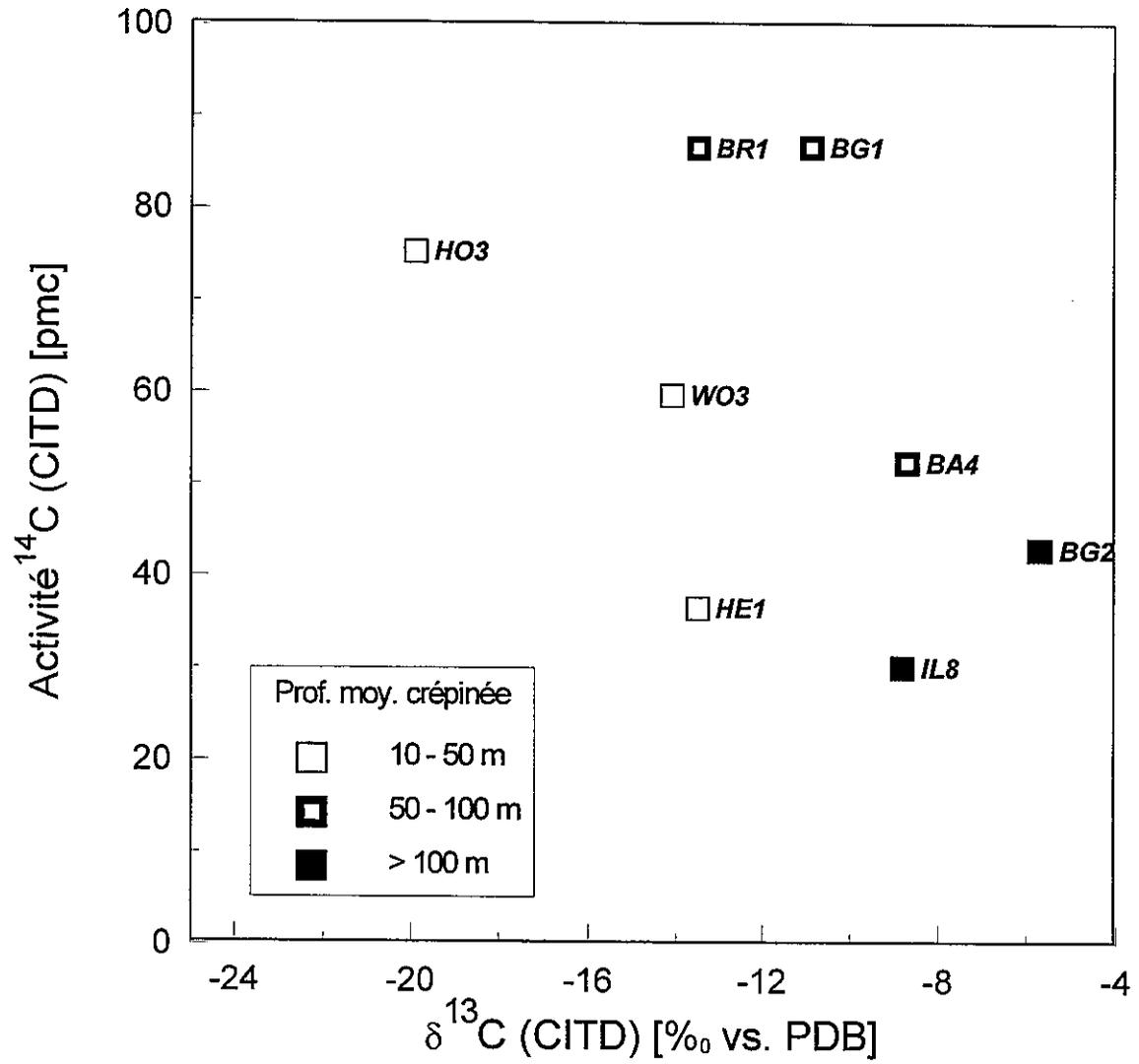


Fig. 15 - Digramme activité ^{14}C versus $\delta^{13}\text{C}$ (isotopes du carbone Inorganique dissous) pour les eaux de l'aquifère rhénan

| Forage | | ³ H | | Type d'eau | A ¹⁴ C | | δ ¹³ C ‰ vs PDB | "Age ¹⁴ C calculé" ans BP | Remarques |
|----------------------|-----|----------------|-----|---------------------------------|-------------------|-----|-------------------------------|--|---|
| | | UT | ± | | % carb. | ± | | | |
| Balgau/Fessenheim | BA4 | 14,0 | 2 | Composante filtrat de rive | 52,4 | 0,4 | -8,7 | 0-1200 | récent |
| Niederhergheim | NH4 | 17,0 | 3 | Eau récente | 63 | 0,3 | -11,3 | 0-1200 | récent |
| Bremgarten mittel | BE1 | 40,1 | 2 | Composante filtrat de rive | 86,7 | 1,1 | -10,9 | récent | récent |
| Bremgarten tief | BE2 | 31,0 | 1,7 | Composante filtrat de rive | 42,9 | 5,4 | -5,7 | récent | récent |
| Breisach TP1 | BR1 | 21,0 | 0,9 | Composante filtrat de rive | 86,6 | 5,8 | -13,5 | récent | récent |
| Heitersheim Eschbach | HE1 | 7,4 | 1 | Mélange eau récente/ancienne | 36,5 | 0,6 | -13,5 | 3700-7300 | "âge" minimal de la composante la plus ancienne |
| Holtzheim | HO3 | 10,0 | 2 | Mélange eau récente/ancienne | 75,3 | 0,4 | -19,9 | 600-4200 | "âge" minimal de la composante la plus ancienne |
| Illkirch | IL8 | 3,0 | 1 | Composante filtrat de rive | 30,1 | 0,2 | -8,8 | 2400-6000 | "âge" minimal de la composante la plus ancienne |
| Wolfisheim | WO3 | 28,0 | 3 | Eau récente | 59,7 | 0,3 | -14,1 | 0-3600 | récent |

Tab. 8 – Estimation du temps de résidence de l'eau dans l'aquifère sur la base des analyses ³H et ¹⁴C

Conclusion

L'étude hydrogéochimique et isotopique de l'aquifère alluvial rhénan à partir de la surface et jusqu'au substratum constitue un premier pas dans l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe vis-à-vis des pollutions. L'accent a été mis aussi bien sur la caractérisation du milieu hydrochimique naturel que sur l'impact anthropique et les traceurs chimiques et isotopiques ont été choisis en fonction de ces objectifs.

Les eaux de la nappe de l'aquifère rhénan ont été caractérisées sur le plan chimique et isotopique dans quatre secteurs entre Strasbourg et Fessenheim-Breisach, des deux côtés du Rhin. Au total, 13 forages profonds multi-crépines ou multi-tubes ont fournis 56 échantillons à des profondeurs différentes; les résultats permettent d'établir un schéma de la répartition spatiale de la qualité des eaux et de tirer des conclusions sur leur temps de résidence

Les eaux d'infiltration acquièrent dans le cas général, un caractère bicarbonaté-calcique dans la zone peu profonde de la nappe. Trois principales déviations de ce faciès ont été observées :

- des eaux du type chloruré-sodique avec des concentrations parfois très élevées en chlorures et en sodium. Une partie de ces eaux contient une composante de filtrat de rive du Rhin aisément identifiable par ses teneurs isotopiques. D'autres se situent dans la zone susceptible d'être influencée par la salinité en provenance des terrils de sel.
- des eaux avec des teneurs en chlorures élevées qui montrent un déficit relatif en sodium et s'approchent donc d'un faciès chloruré-calcique. Des interactions avec les roches silicatées contenues dans les sables et graviers qui constituent l'aquifère peuvent expliquer ce déficit.
- des eaux sulfatées-calciques avec des fortes teneurs en chlorures et en magnésium ont été identifiées localement. Les teneurs en sulfates sont liées à la dissolution de sulfates évaporitiques solides dans les formations qui forment l'encaissant et le substratum des alluvions.

•

L'analyse des isotopes stables de l'eau (isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène) permet d'identifier la provenance de l'eau, indépendamment de celle des espèces dissoutes. Deux groupes peuvent être distingués dans les eaux de la nappe. Le premier représente la recharge locale ou régionale. Le caractère isotopique est similaire à celui des eaux des sources et rivières en provenance des Vosges. Un certain nombre de forages situés à proximité du Rhin produisent des eaux qui contiennent une composante de filtrat de rive (eaux de filtration à travers les berges du Rhin).

Dans certains cas, les filtrats de rive ont un temps de résidence prolongé dans la nappe. Il s'agirait d'eaux anciennes du Rhin infiltrées jusqu'à des profondeurs supérieures à 100 m.

Dans aucun des forages étudiés, la combinaison des différents traceurs isotopiques ne permet de conclure sur une éventuelle contribution d'eaux d'âge pléistocène (> 10000 ans).

Les eaux salines sulfatées se distinguent sur le plan isotopique : les teneurs isotopiques des sulfates dissous se situent dans le domaine des sulfates évaporitiques (gypse, anhydrite) qui, par leur dissolution, apportent la majeure partie des sulfates en phase aqueuse. Dans eaux à plus faible concentration en sulfates, le soufre proviendrait plutôt de sources atmosphériques, organiques ou sédimentaires (sulfures).

Les isotopes des sulfates ne montrent pas de signe de réduction des sulfates en sulfures, ce qui serait d'ailleurs incompatible avec le caractère généralement oxydant des eaux, même en profondeur.

Les halogénures Cl et Br contenus dans les eaux salines du secteur de Breisach montrent sans exception des rapports Cl/Br très élevés comparés au rapport marin, ce qui indique la dissolution de sels solides comme source des chlorures.

Les rapports isotopiques du bore couvrent une gamme très large et les valeurs déterminées pour les eaux salines de Bremgarten se situent parmi les plus élevées rapportées dans la littérature. Les isotopes du bore constituent, en conséquence, un traceur potentiel très intéressant d'un certain type de contamination en chlorures probablement lié aux apports de sel ou de saumure. Il s'avère néanmoins indispensable de mieux caractériser les pôles de mélange potentiels sur le plan isotopique, notamment les sels solides des terrils, les saumures d'infiltration et les eaux non affectées par la salinisation.

La pénétration des nitrates et du tritium constitue tous les deux un indice de l'impact humain sur la nappe. On observe une tendance générale de diminution des nitrates et du tritium dans la nappe avec la profondeur ; néanmoins deux constatations s'imposent : Aucune des eaux même prélevées à des profondeurs supérieures à 100 m n'est exempte de tritium. Il apparaît donc que des eaux jeunes peuvent s'infiltrer rapidement jusqu'à des profondeurs proches de la base de l'aquifère.

Les eaux profondes peuvent contenir des concentrations significatives en nitrates. Le transfert rapide de polluants sur toute l'épaisseur de la nappe ne peut donc pas être exclu. On peut également conclure que la nappe profonde n'a généralement pas la capacité d'éliminer les nitrates par des processus naturels de réduction (dénitrification).

L'étude des teneurs isotopiques du carbone inorganique dissous et des carbonates solides qui constituent une partie de la matrice de l'aquifère permet de tirer des conclusions sur les interactions de l'eau infiltrante avec les gaz du sol et avec les carbonates. Les graviers calcaires montrent des teneurs isotopiques qui les caractérisent comme marins, indépendamment de leur état d'altération. Le ciment calcitique et les encroûtements calcitiques rencontrés dans les nouveaux ouvrages du côté français sont marqués par l'influence de carbone organique en provenance du CO₂ du sol.

Nous avons utilisé deux modèles de "datation" des eaux par le radiocarbone qui permettent de prendre en compte l'effet d'une dissolution en système ouvert et en système fermé vis-à-vis du CO₂ du sol.

Les teneurs en tritium montrent qu'aucune des eaux n'est dépourvue de toute composante jeune. Les "âges" ¹⁴C calculés constituent donc des âges mixtes que l'on peut considérer comme des âges minimaux d'une éventuelle composante ancienne. Dans plusieurs cas, les âges élevés d'eaux qui contiennent pourtant du tritium, montrent des mélanges entre eaux jeunes et anciennes. Les temps de résidence de l'ordre de plusieurs milliers d'années ont été calculés pour trois forages dans les secteurs de Strasbourg et de Breisach (Illkirch, Holtzheim et Heitersheim-Eschbach).

Bibliographie

- Balderer W., Pearson F.J.Jr., Soreau S. (1991) Sulphur and Oxygen Isotopes in Sulphate and Sulphide. in Applied isotope hydrology. A case study in northern Switzerland. Studies in Environmental Science, 43, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 297-325.
- Bottomley D.R., Gregoire D.C., Raven K.G. (1994) Saline groundwaters and brines in the Canadian Shield: Geochemical and isotopic evidence for a residual brine component. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 1483-1498.
- Casanova J., Machard de Gramont H., Kloppmann W., Négrel P. (1999) : Boron and strontium isotopic geochemistry of the Wadi Ahin catchment (Sultanate of Oman). - EUG 10 meeting, Strasbourg, 28.3 - 1.4.1999, Terra Abstracts, 11, 557.
- EAT (1997) Région Alsace - Etude de l'évolution de la pollution de la nappe d'Alsace par des organochlorés au droit et à l'aval de Benfeld - Beneld, Erstein, Sand, suivi de forage, rapport final. - Rapport EAT 71-2-0400/3.
- EAT (1998) Région Alsace - Etude de l'évolution de la pollution de la nappe d'Alsace par des organochlorés au droit et à l'aval de Benfeld - Beneld, Erstein, Sand, deuxième campagne de prélèvements, rapport d'analyses. - Rapport EAT EC97015/1.
- Elsass P., Rau S. (1995) Eoupes hydrogéologiques Strsbourg-Offenburg. Notice. Initiative communautaire INTERREG, Cartographie hydrogéologique du Rhin supérieur. Région Alsace, Strasbourg, avril 1995.
- Garcia, D. (1986) - Etude isotopique et géochimique des eaux thermales des Vosges méridionales. Applications géothermiques. Doc. BRGM N° 112.
- Göppel, M., Eichinger, L. (1997) - Isotopenhydrologische und hydrochemische Untersuchungen im Bereich des Oberrheingrabens. Rapport Hydroisotop.
- Ingerson, E. and Pearson, F.J.(1964): Estimation of age and rate of movement of groundwater by the ¹⁴C method.-In: Recent researches in the Fields of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry. Maruzen, Tokyo, 263-283.
- Kloppmann W., Négrel P., Casanova J., Guerrot C., Klinge H. (1999) Boron and Strontium isotopes in groundwaters and brines of the North German Basin (Gorleben diapir). - EUG 10 meeting, Strasbourg, 28.3 - 1.4.1999, Terra Abstracts, 11, 584.
- Kloppmann, W., Dever, L., Edmunds, W.M. (1998) : Residence time of Chalk groundwaters in the Paris Basin and in the North German Basin: A geochemical approach. - *Applied Geochemistry*, 13 (5), 593-606.

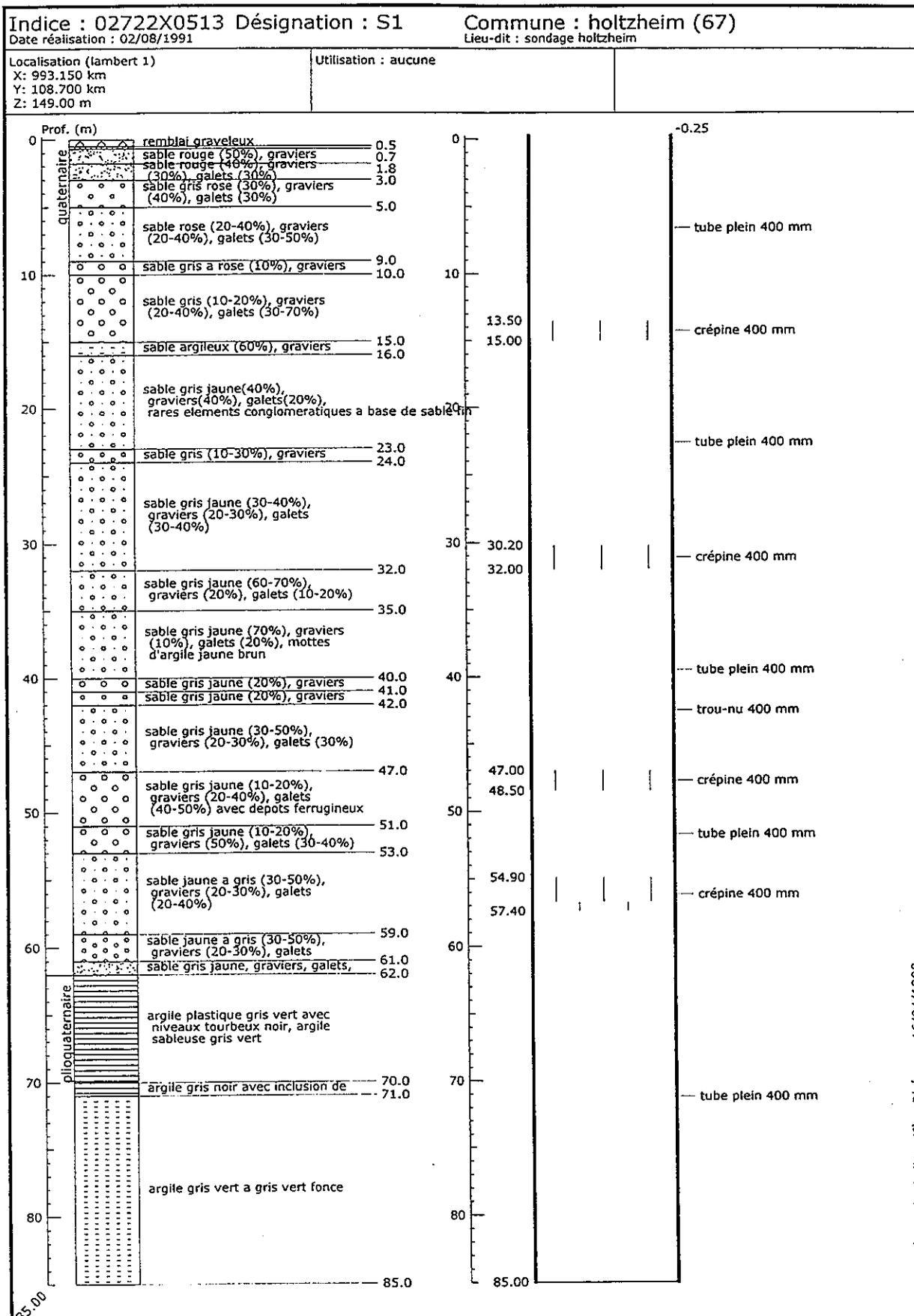
- Leenhouts J., Basset R.L., Maddoch T. (1998) Utilisation of intrinsic boron isotopes as co-migrating tracers for identifying potential nitrate contamination sources. - *Ground Water*, 36, 240-250.
- Negrel P., Casanova J., Kloppmann W., Aranyossy J.F. (1999) : Origin of deep saline groundwaters in the Vienne granitoids (France); constraints inferred from strontium and boron isotopes. - EUG 10 meeting, Strasbourg, 28.3 - 1.4.1999, *Terra Abstracts*, 11, 520.
- Noyer M.L., Menjot A., Elsass Ph., Thiéry D., Martin J.C. avec la collaboration de Sauty J.P., Vanéry D., Martin J.C. avec la collaboration de Sauty J.P., Vançon J.P. (1998) Modèle de la nappe d'Alsace - Projet de développement 312. - Rap. final. Rap. BRGM R40335, 207p.
- Pearson, F.J. (1991) - Carbonate isotopes.- in *Applied isotope hydrology. A case study in northern Switzerland. Studies in Environmental Science*, 43, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- Salem, O., Visser, J.M., Dray, M., Gonfiantini, R. (1980): Groundwater flow patterns in the Western Lybian Arab Jamahirija evaluated from isotopic data. - "Arid-zone Hydrology: Investigation with isotope techniques", IAEA, Vienna, 591-602.
- Vengosh A. (1998) Boron isotopes and groundwater pollution. - *Water & Environment News*, 3, 15-16.
- Vengosh A., Chivas A.R., McCulloch M.T., Starisnky A., Kolodny Y. (1991a) Boron isotope geochemistry of Australian salt lakes. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 2591-2606.
- Vengosh A., Kolodny Y., Starisnky A., Chivas A.R., McCulloch M.T. (1991b) Coprecipitation and isotopic fractionation of boron in modern biogenic carbonates. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 2901-2910.
- Vengosh A., Starisnky A., Kolodny Y., Chivas A.R., Raab M. (1991) Boron isotope variations during fractional evaporation of sea water: New constraints on the marine vs. nonmarin debate. - *Geology*, 20, 799-802.
- Wigley T.M.L. (1975): Carbon 14 Dating of Groundwater From Closed and Open Systems. - *Water Resour. Res.* 11, 324-328.
- Wigley T.M.L. (1976): Effects of mineral precipitation on isotpic composition and ¹⁴C dating of Groundwater. - *Nature (London)*, 263, 219-221.
- Yurtsever, Y., Gat, J.R. (1981): Atmospheric waters. - *in: Stable isotope hydrology, deuterium and oxygen 18 in the water cycle. Techn. Rep. Ser.*, 210, 103-142, Vienne (AIEA), 103-142.

ANNEXES

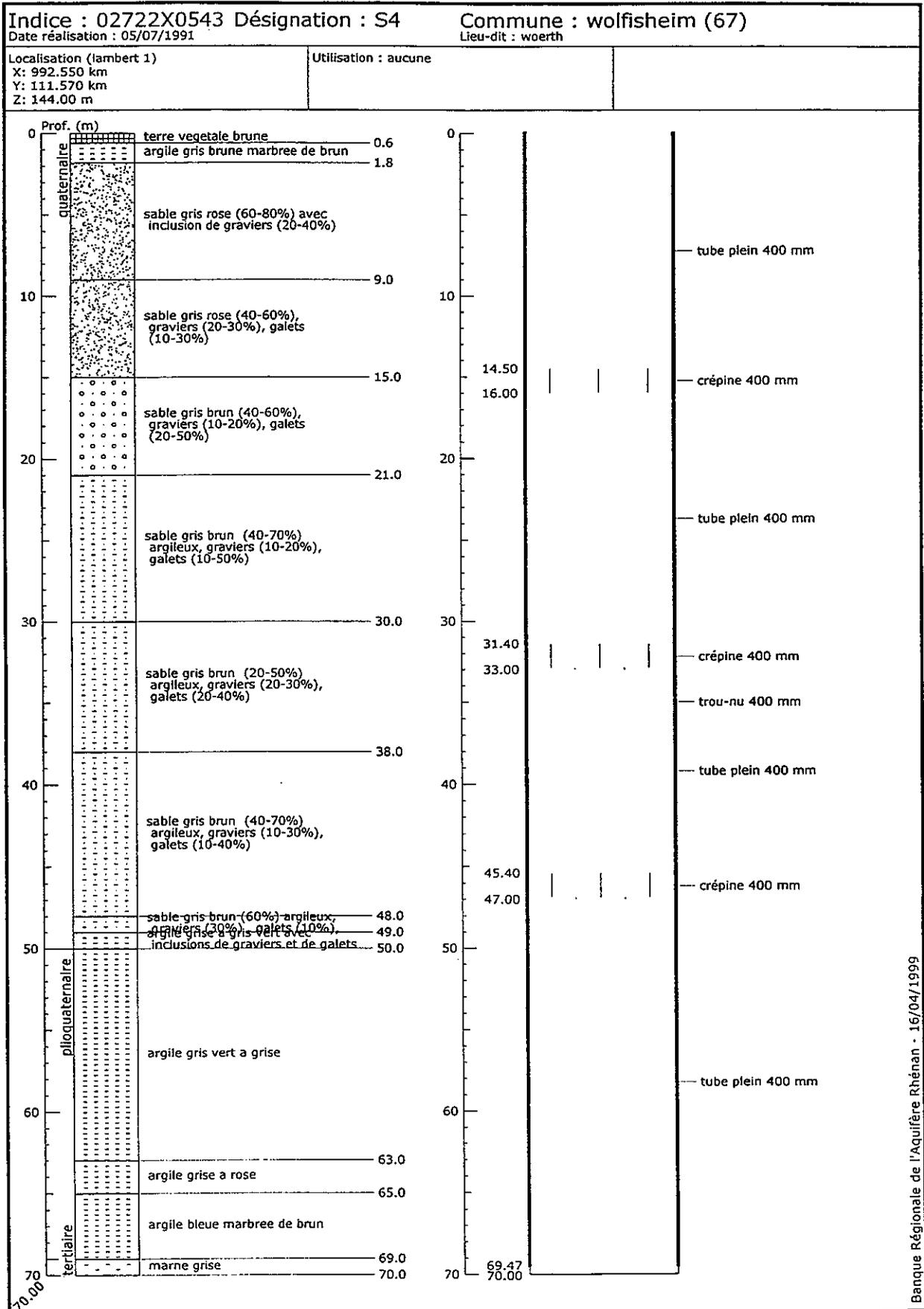
Annexe 1 :

**Caractéristiques des forages (coupe lithologique
et technique)**

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

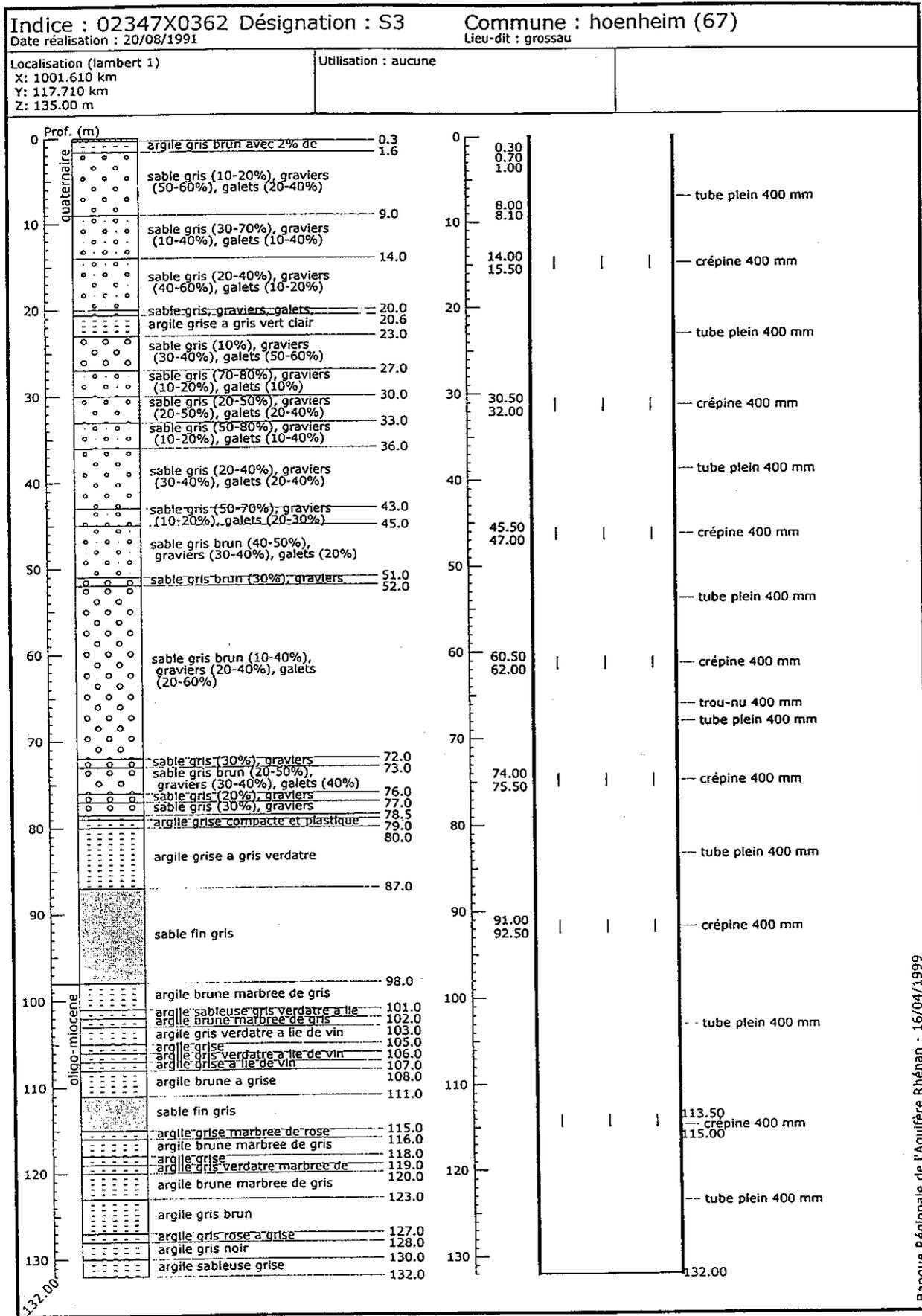


Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan



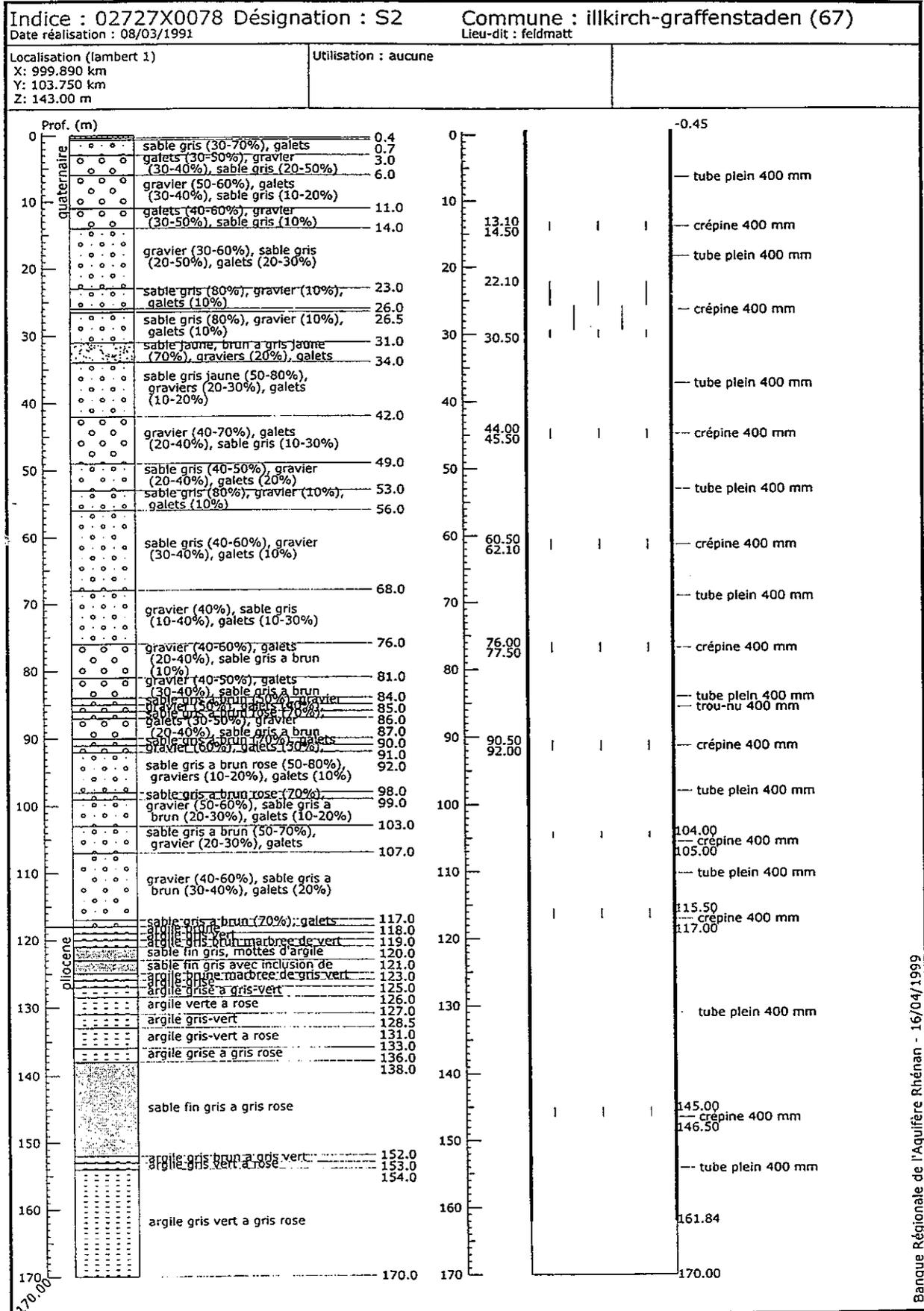
Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 16/04/1999

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan



Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 16/04/1999

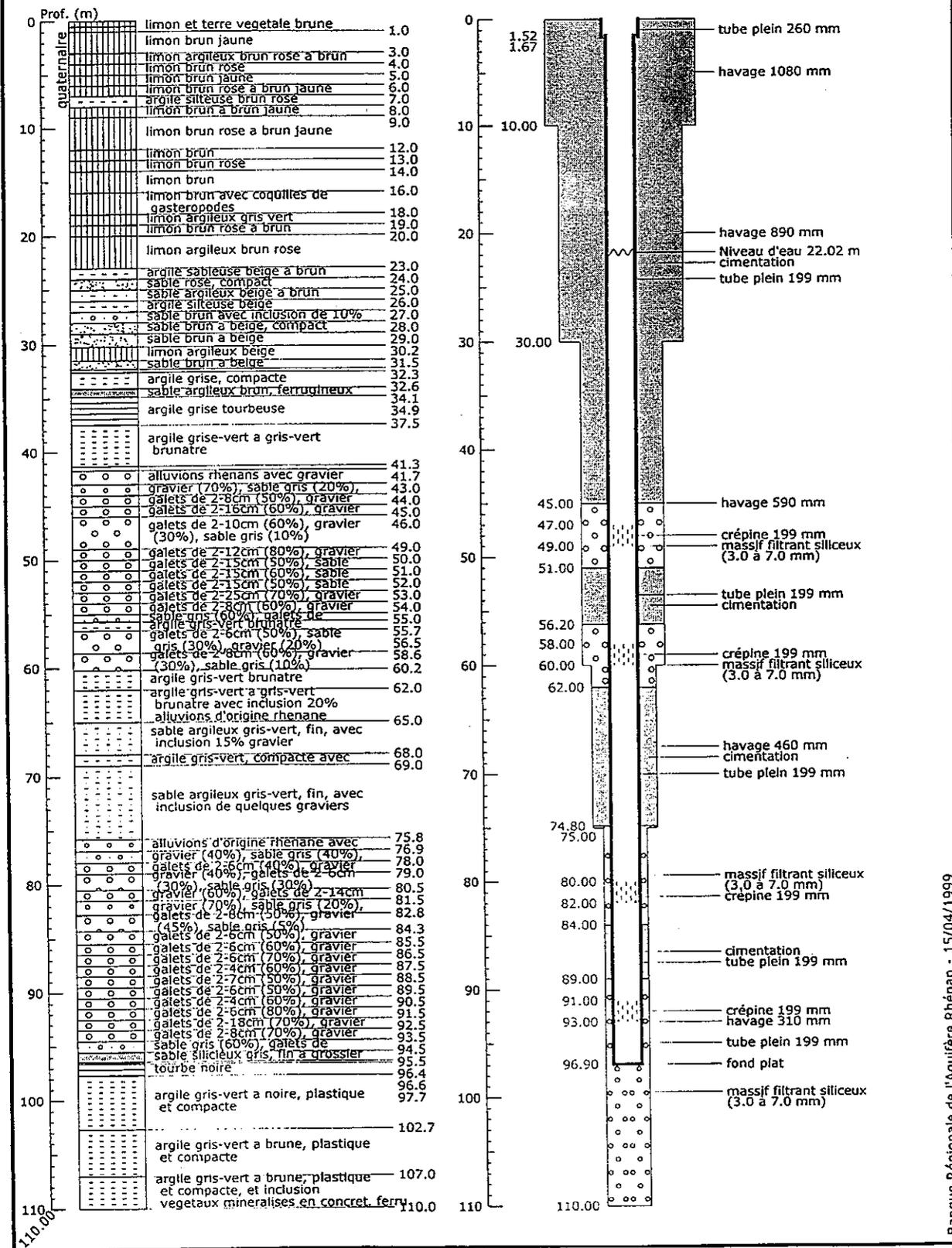
Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan



Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 16/04/1999

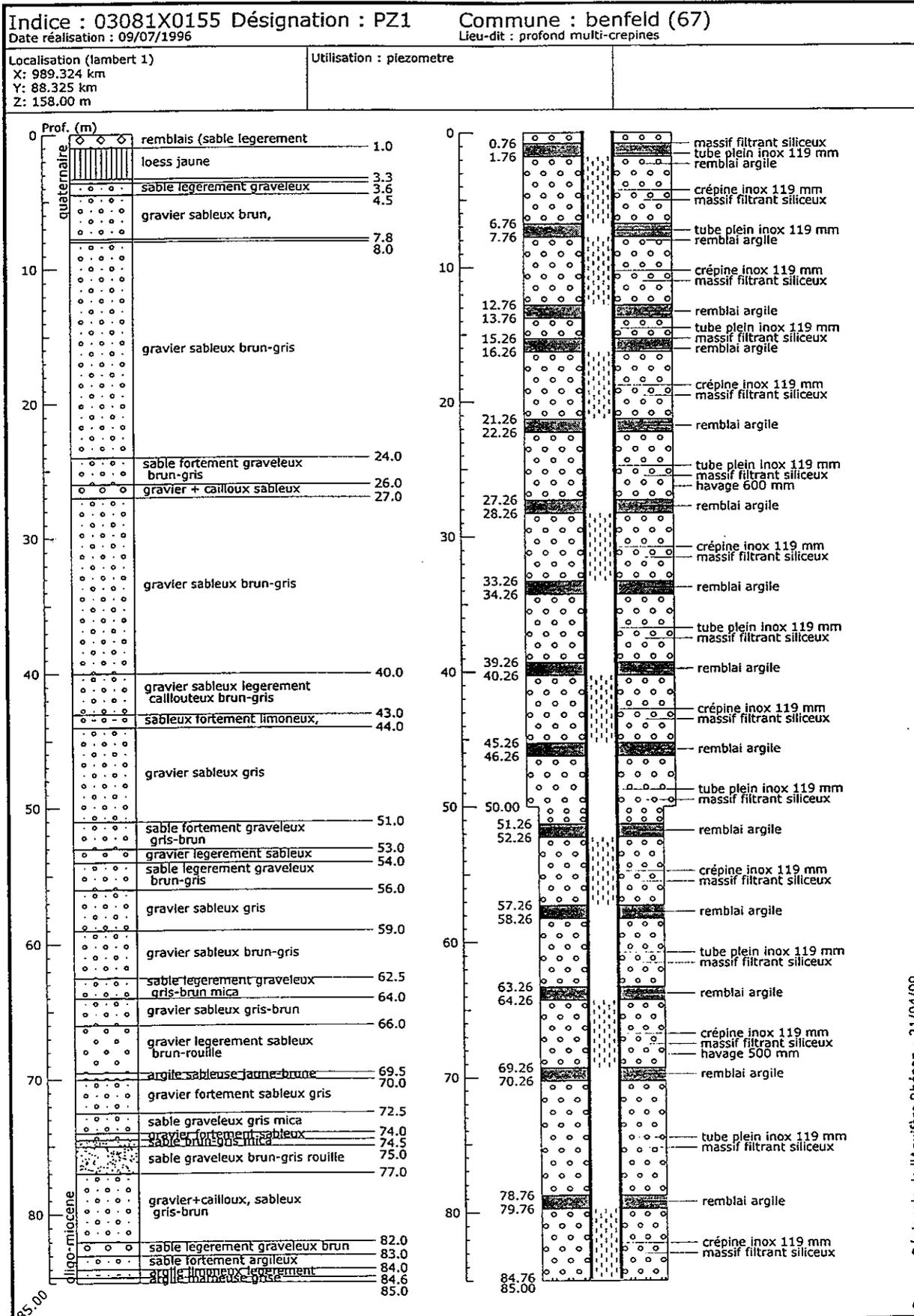
Indice : 02346X0185 Désignation : N6 Commune : pfulgriesheim (67)
 Date réalisation : 17/11/1993 Lieu-dit : wucher

Localisation (lambert 1) Utilisation : alerte Pompage d'essai
 X: 994.533 km Piézométrie indicative (17/11/1993)
 Y: 118.451 km Profondeur niveau d'eau : 22.02 m/sol
 Z: 157.75 m (coupe : 157.50 m) Cote piézométrique : 135.73 m

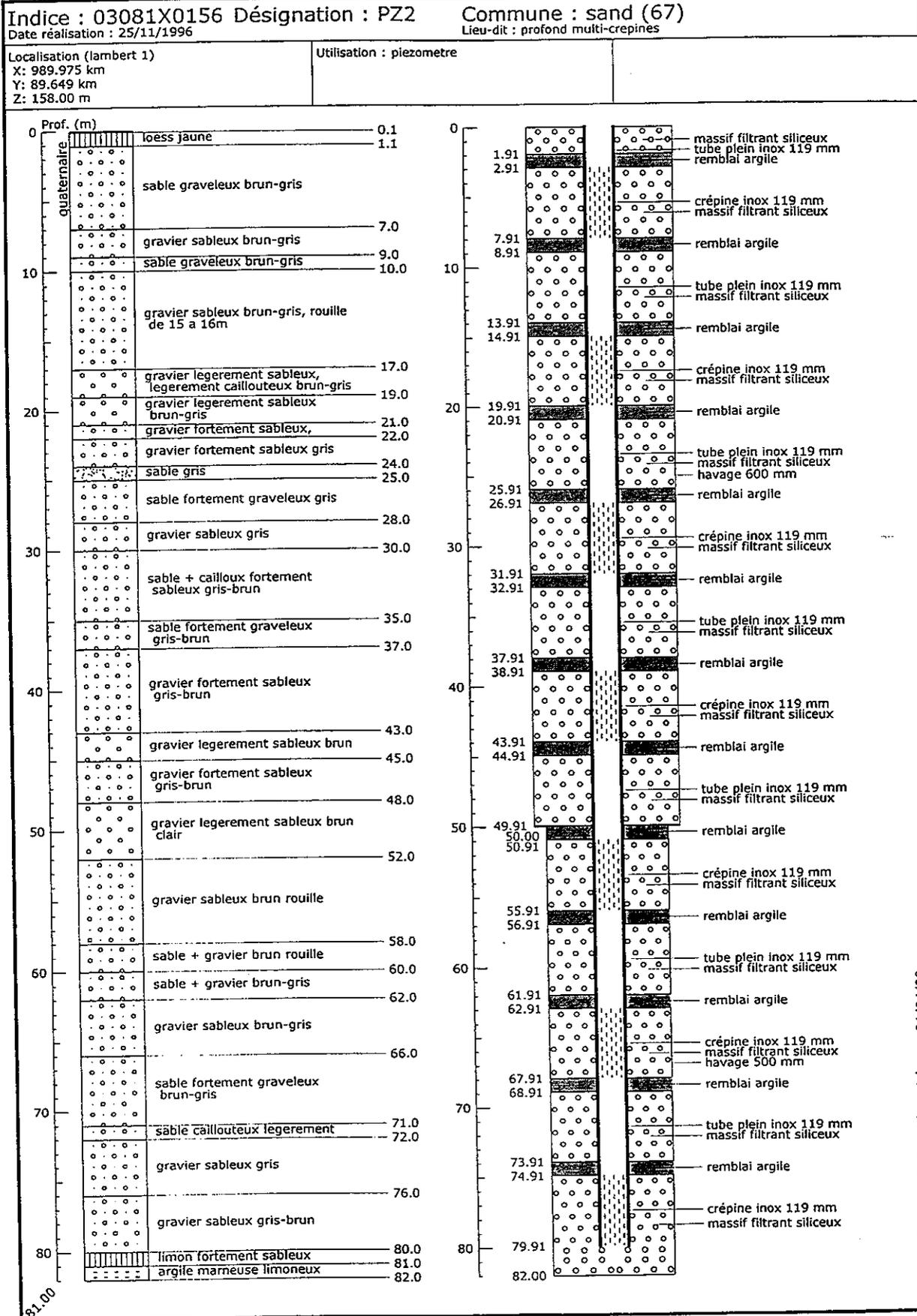


Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan



Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 21/04/99



Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

Indice : 02726X0276 Désignation : PZ3

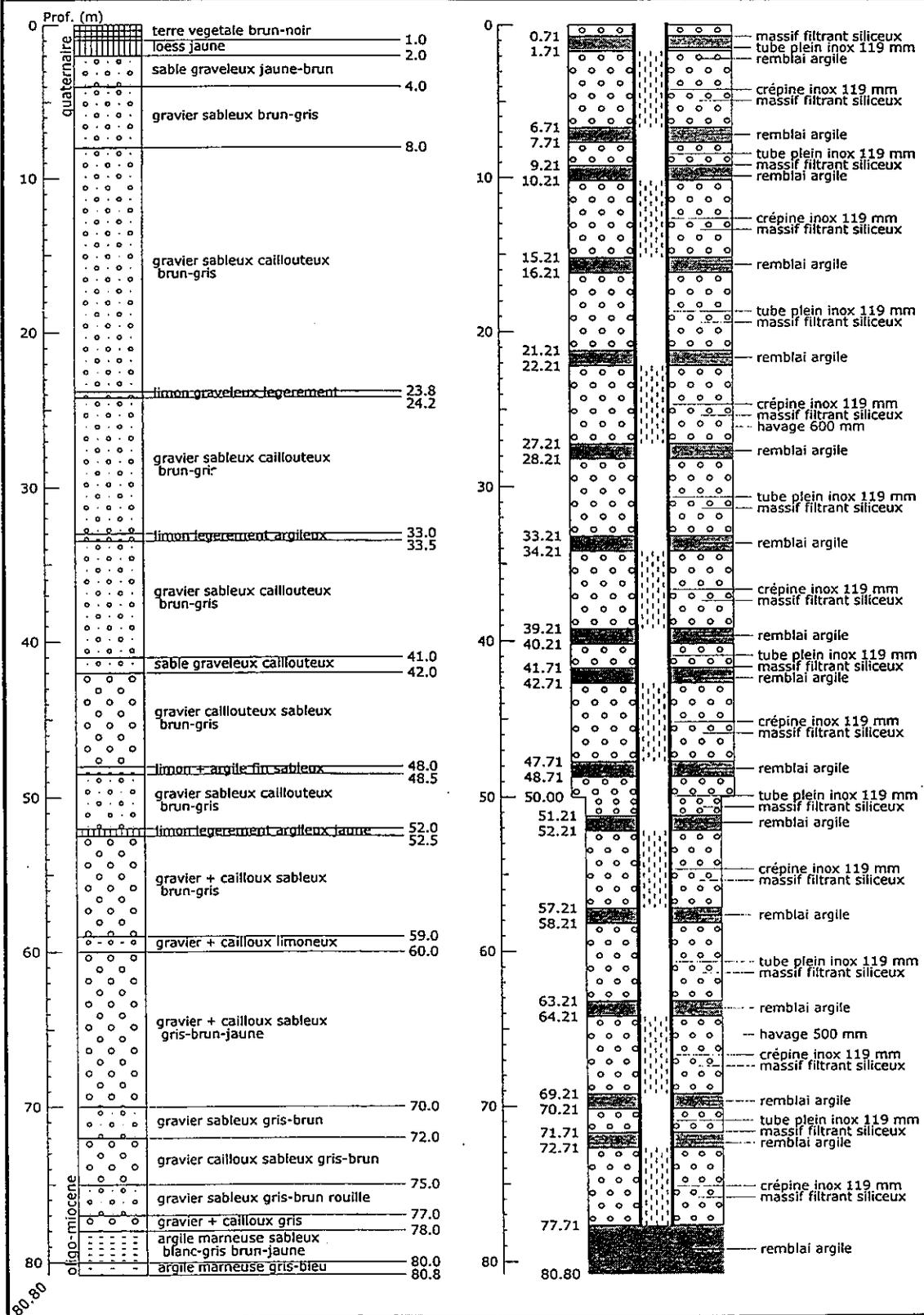
Commune : erstein (67)

Date réalisation : 09/07/1996

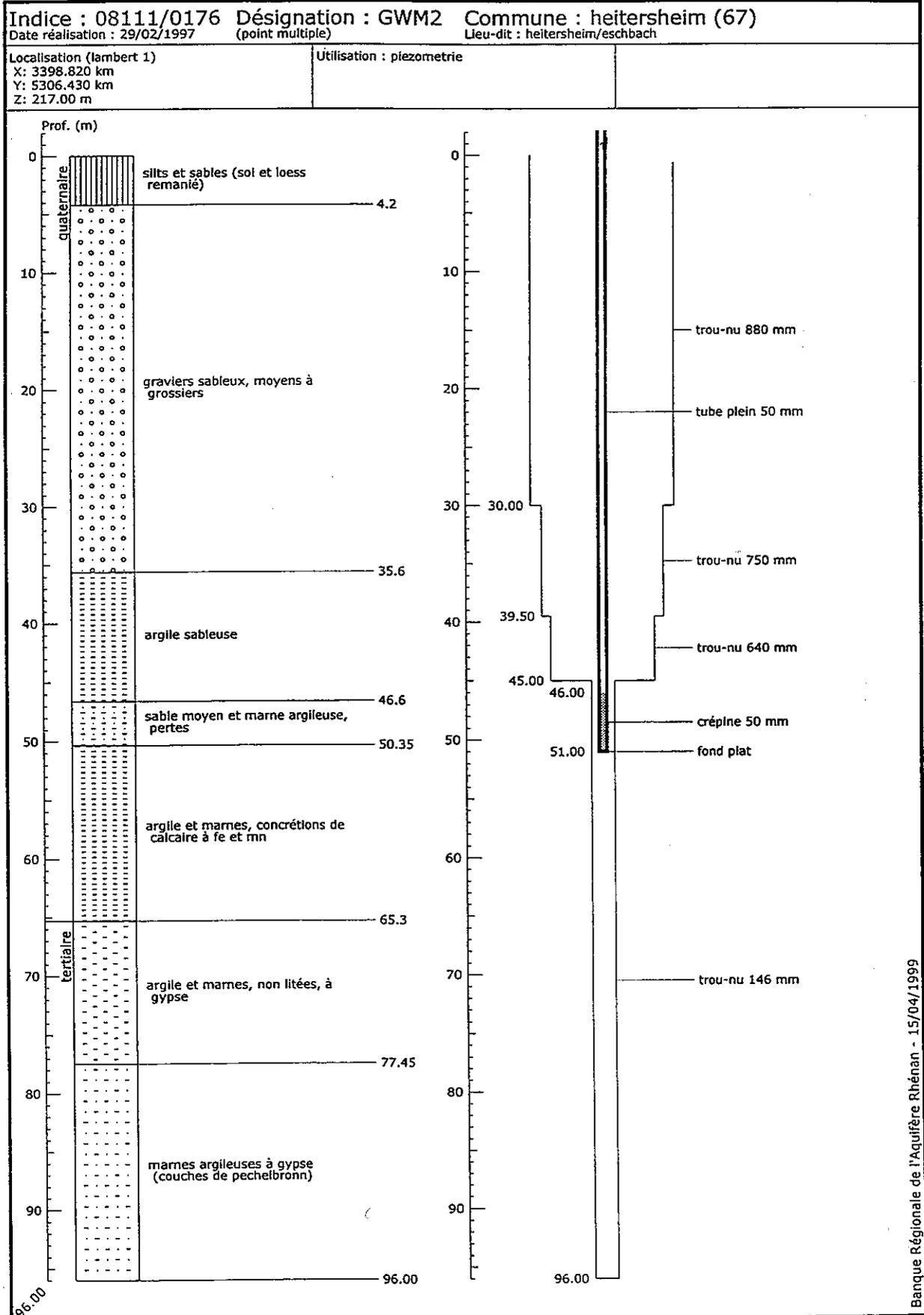
Lieu-dit : profond multi-crepines

Localisation (lambert 1)
X: 993.999 km
Y: 95.899 km
Z: 154.00 m

Utilisation : piezometre

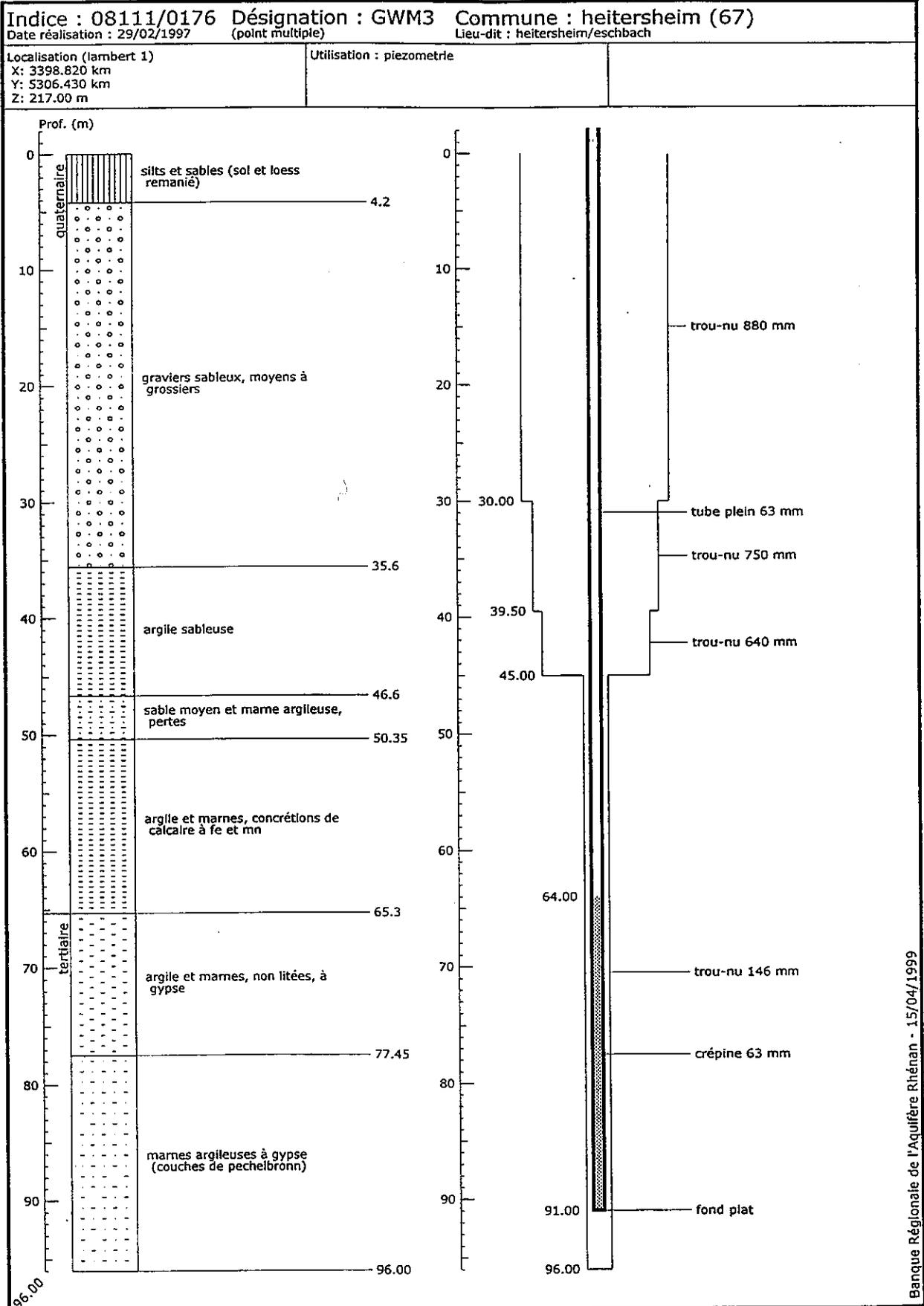


Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 21/04/99



Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

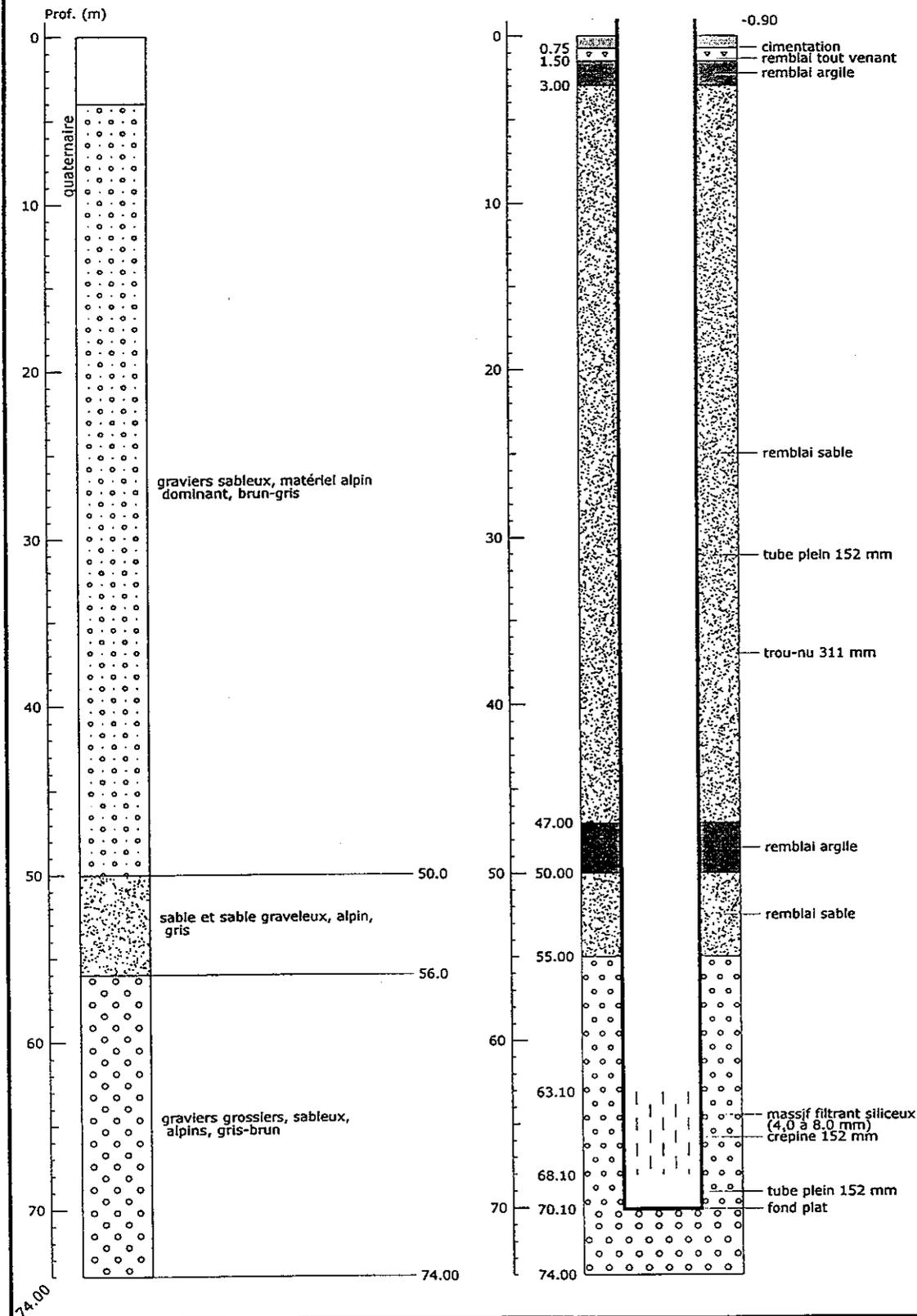


Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

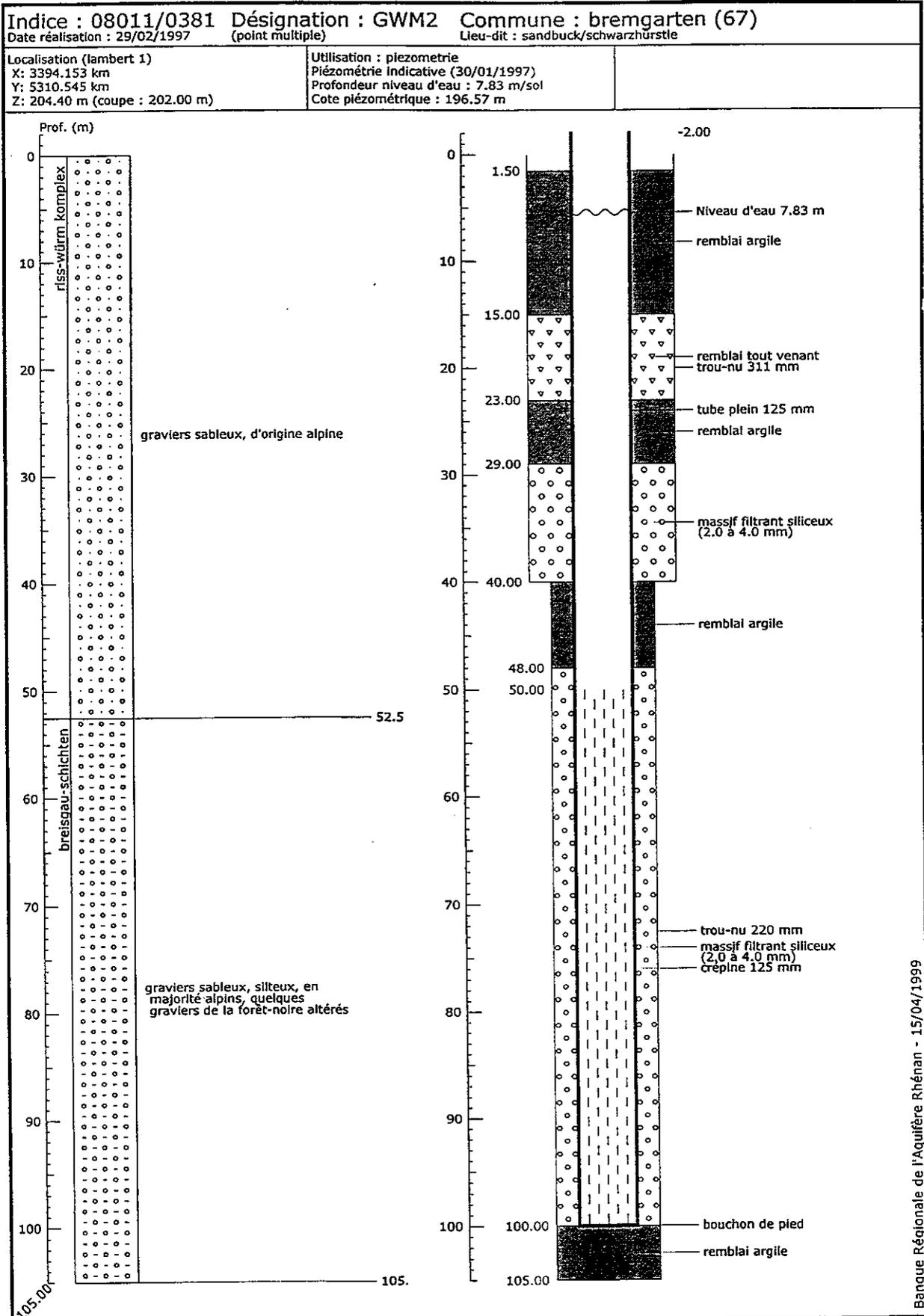
Indice : 07911/0228 Désignation : TP1 66 Commune : breisach (67)
 Date réalisation : 29/02/1997 Lieu-dit : breisach tp1 66

Localisation (lambert)
 X: 3395.682 km
 Y: 5322.211 km
 Z: 190.30 m

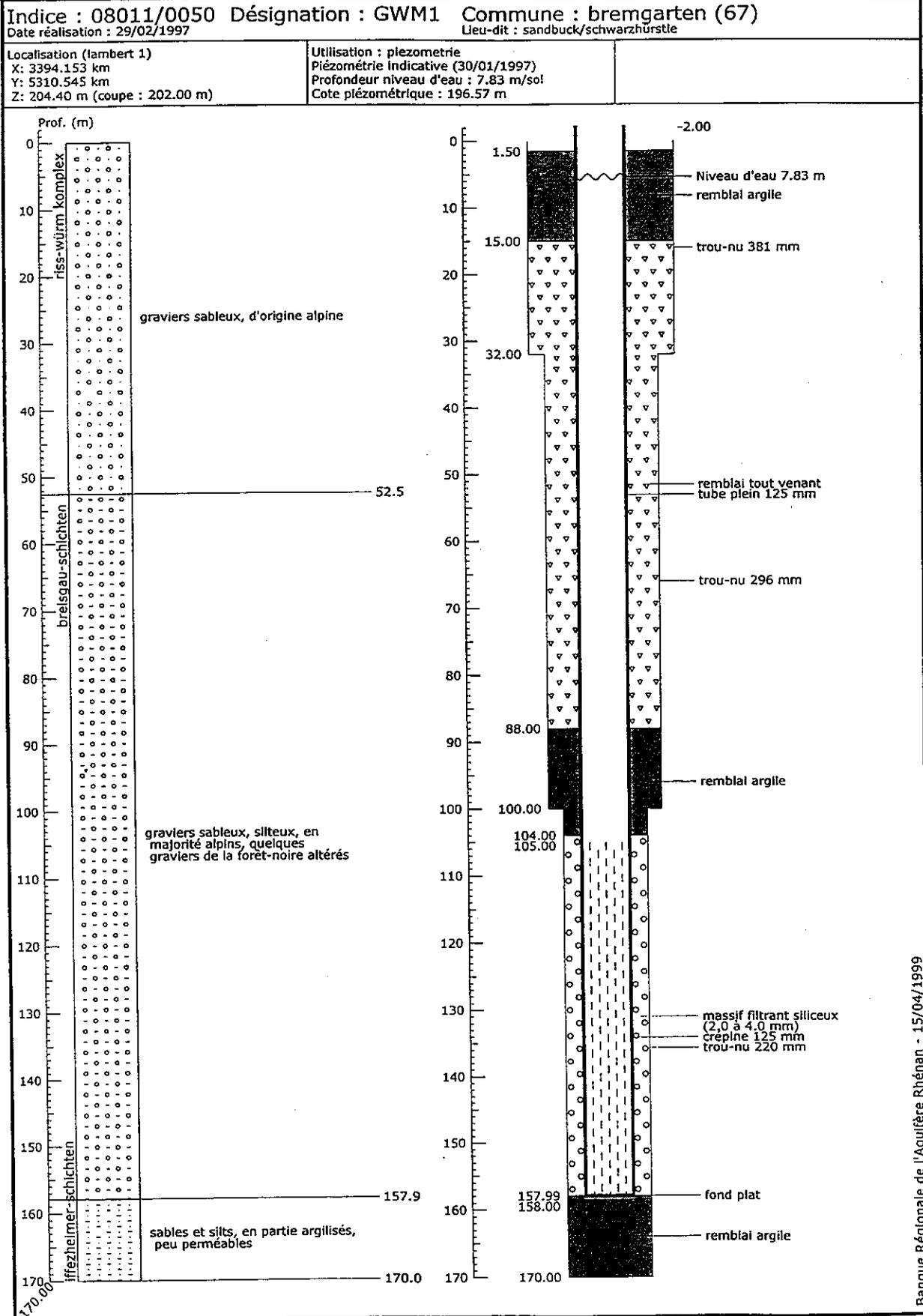
Utilisation : piezometrie



Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999



Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan



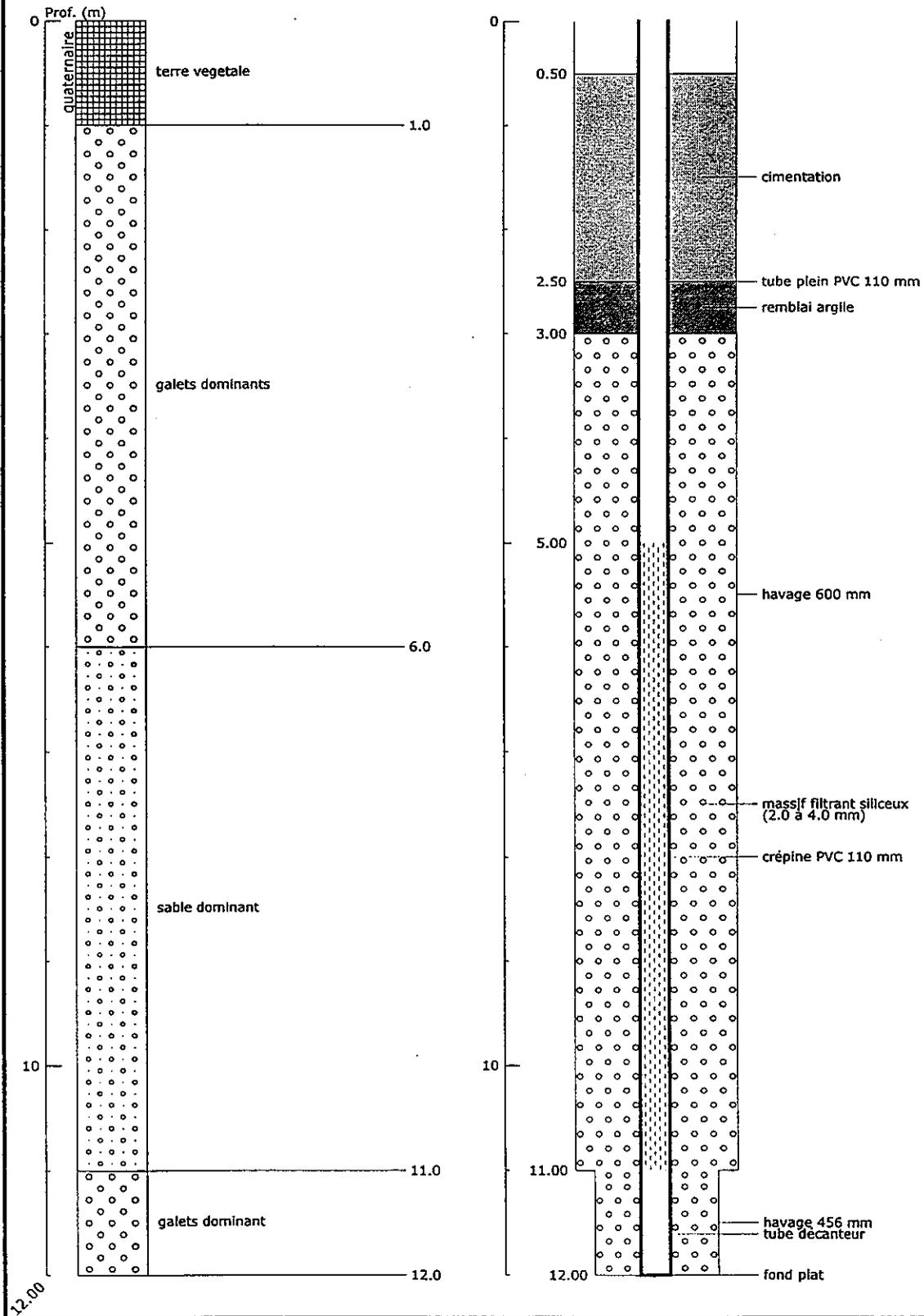
Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

Indice : 03795X0097 Désignation : PM4
Date réalisation : 01/08/1998

Commune : baigau (68)
Lieu-dit : pres poste gaz (pz multiple)

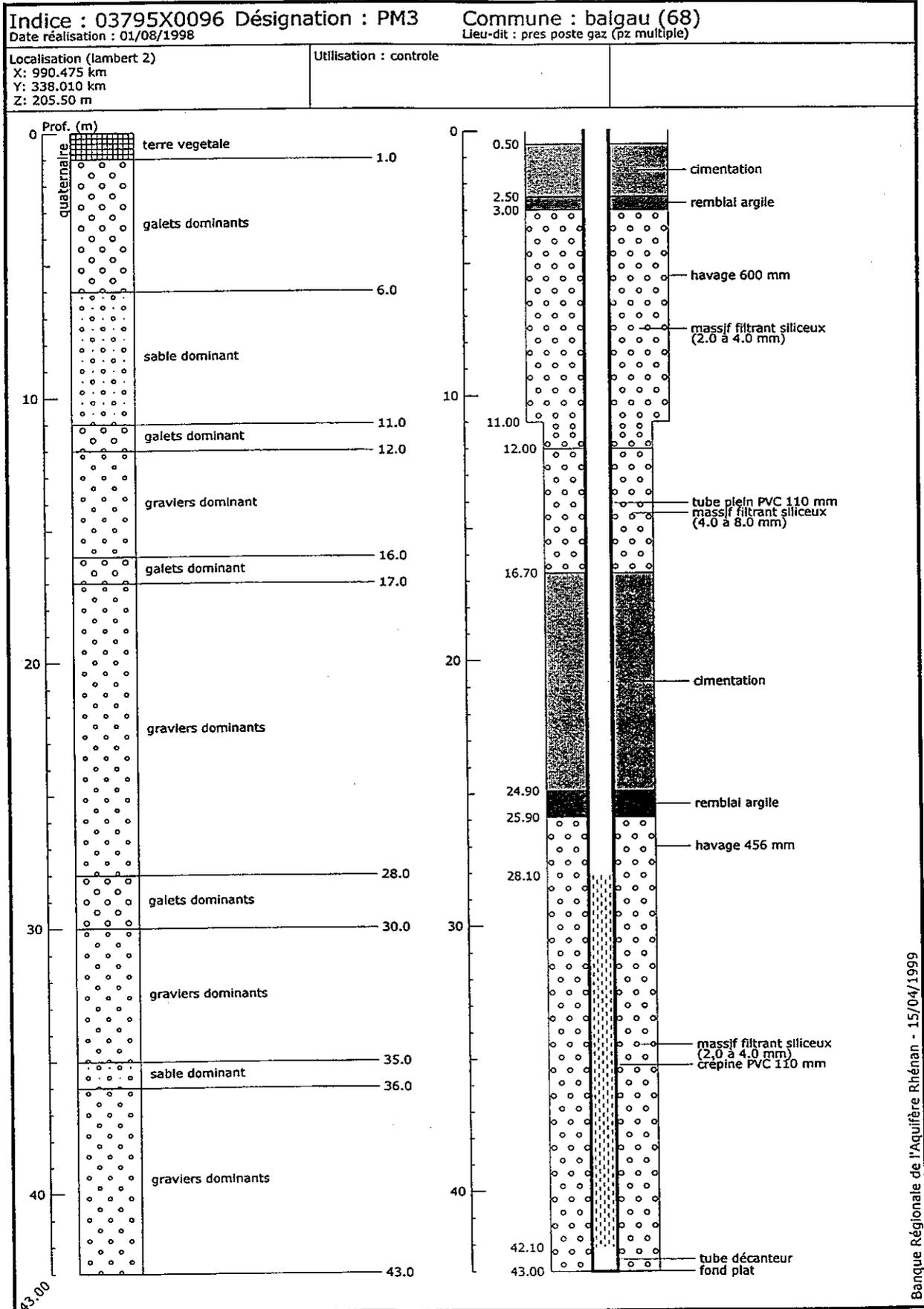
Localisation (lambert 2)
X: 990.475 km
Y: 338.010 km
Z: 205.50 m

Utilisation : controle



Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

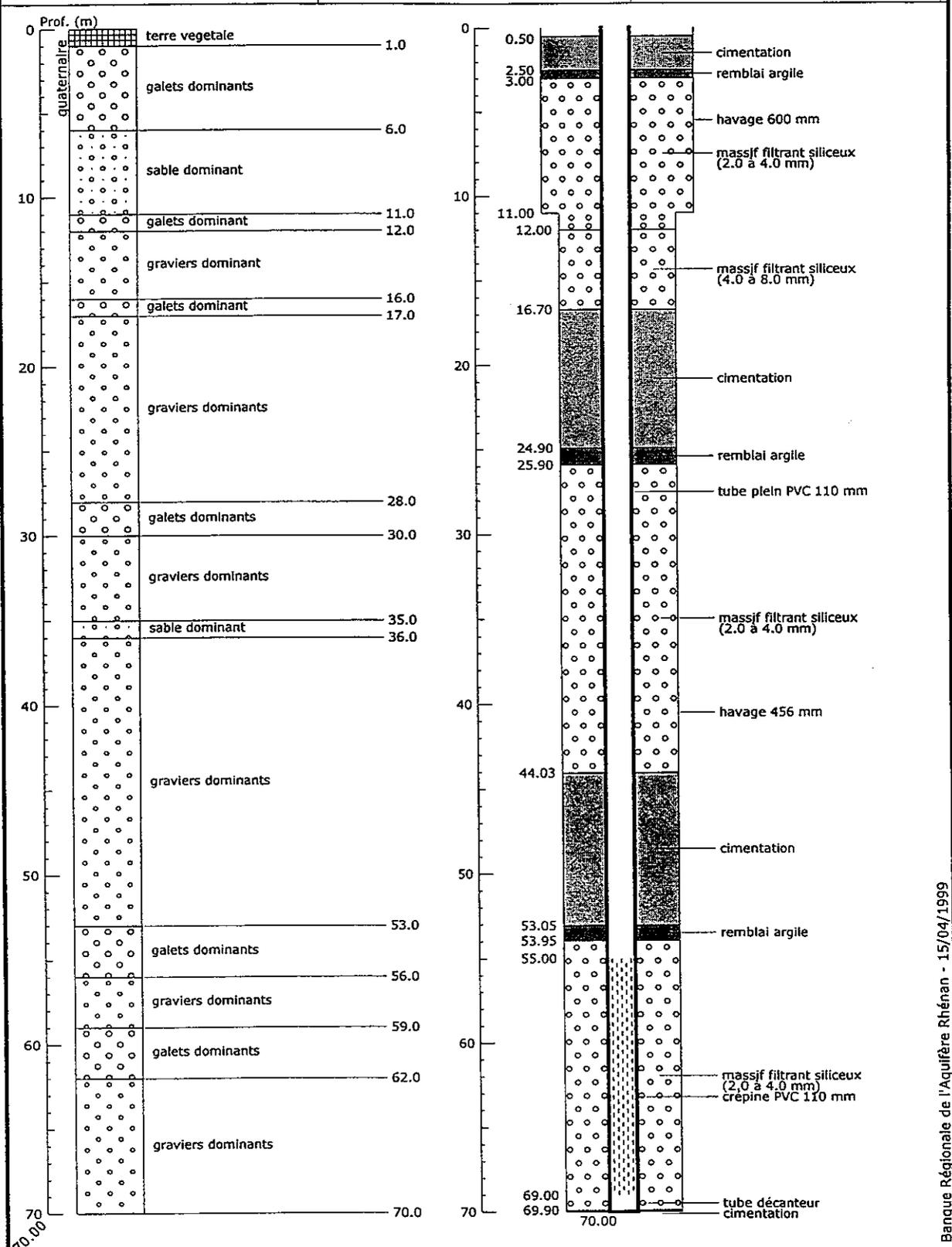


Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

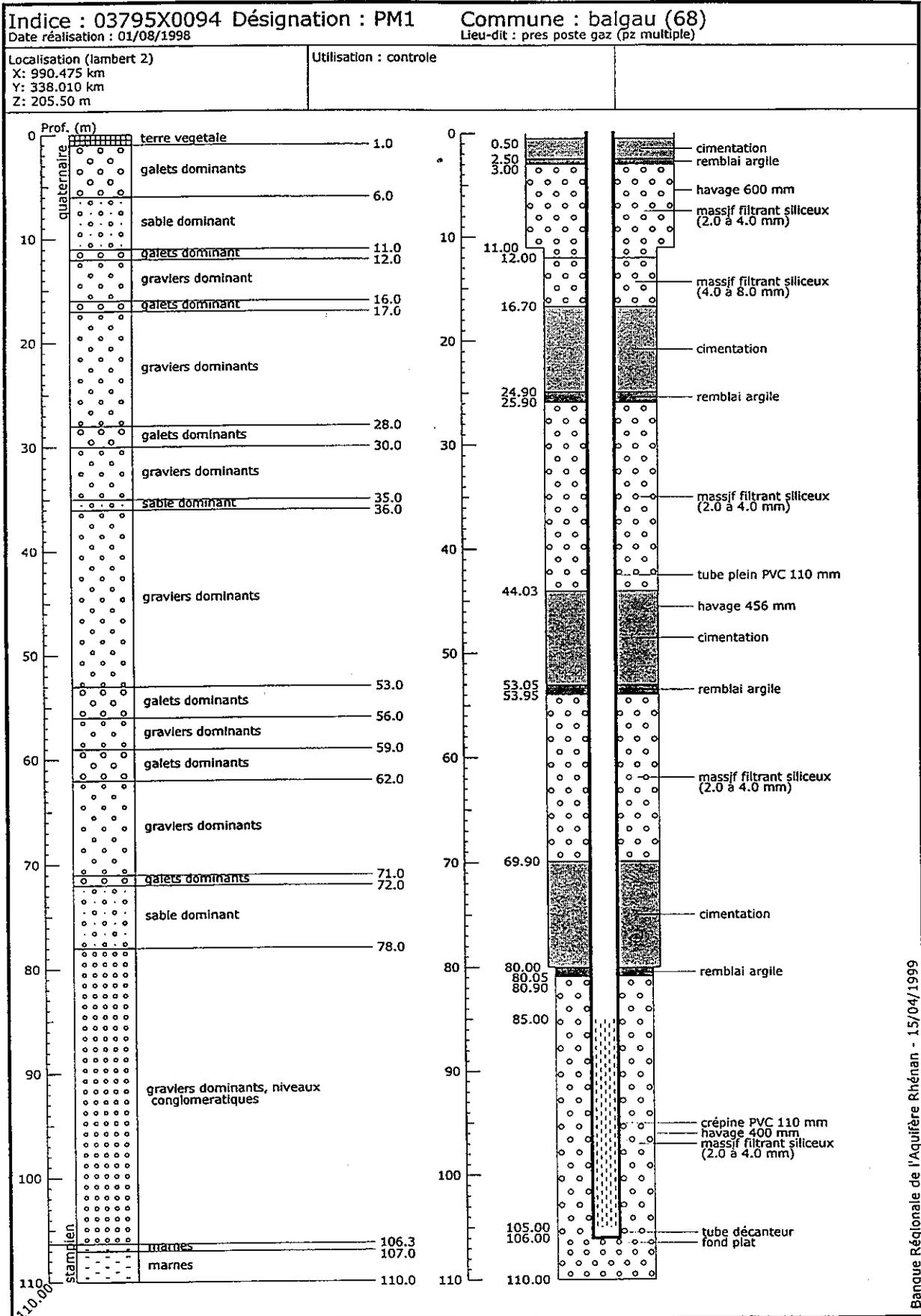
Indice : 03795X0095 Désignation : PM2 Commune : balgau (68)
 Date réalisation : 01/08/1998 Lieu-dit : pres poste gaz (pz multiple)

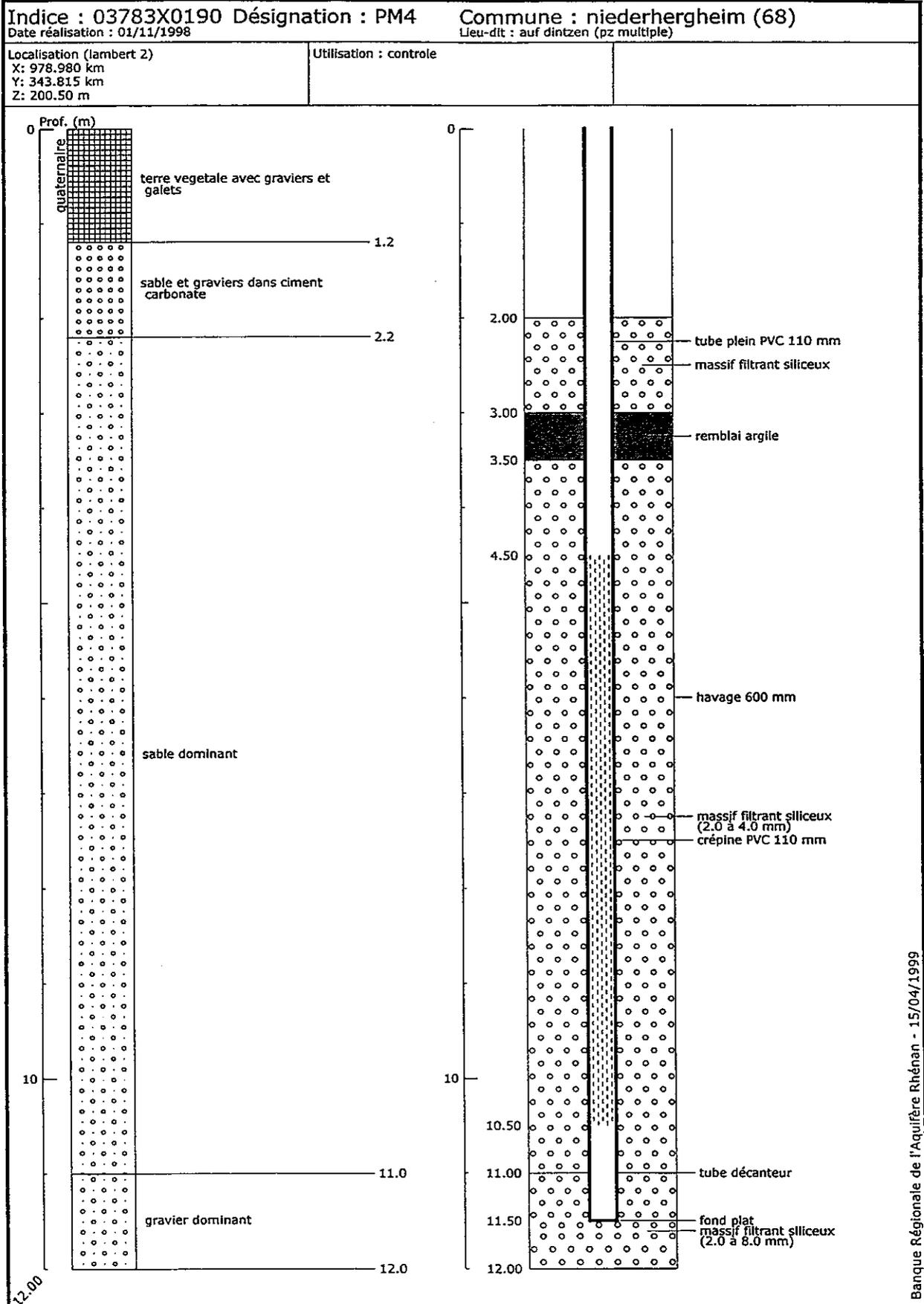
Localisation (lambert 2) Utilisation : controle
 X: 990.475 km
 Y: 338.010 km
 Z: 205.50 m



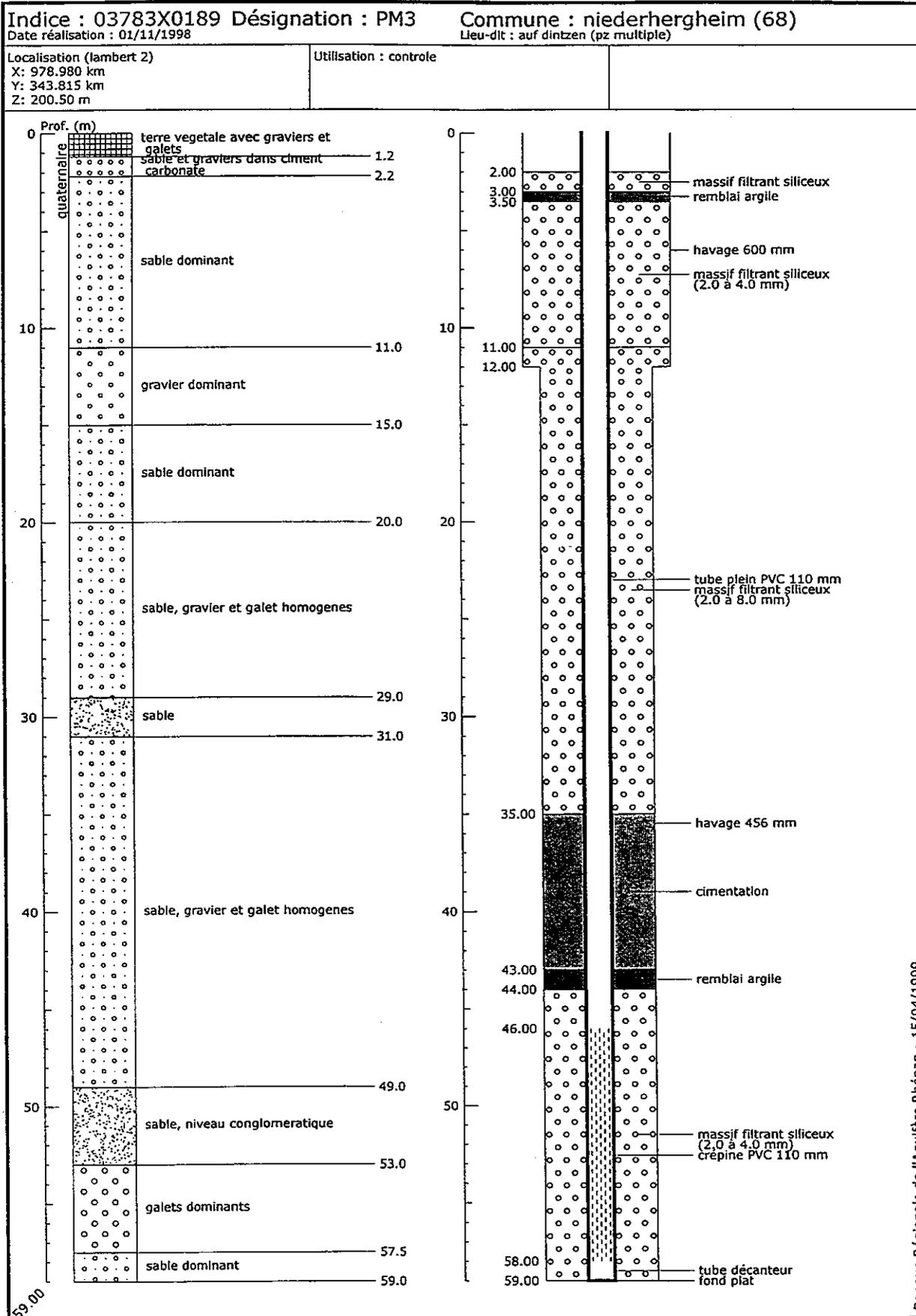
Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan

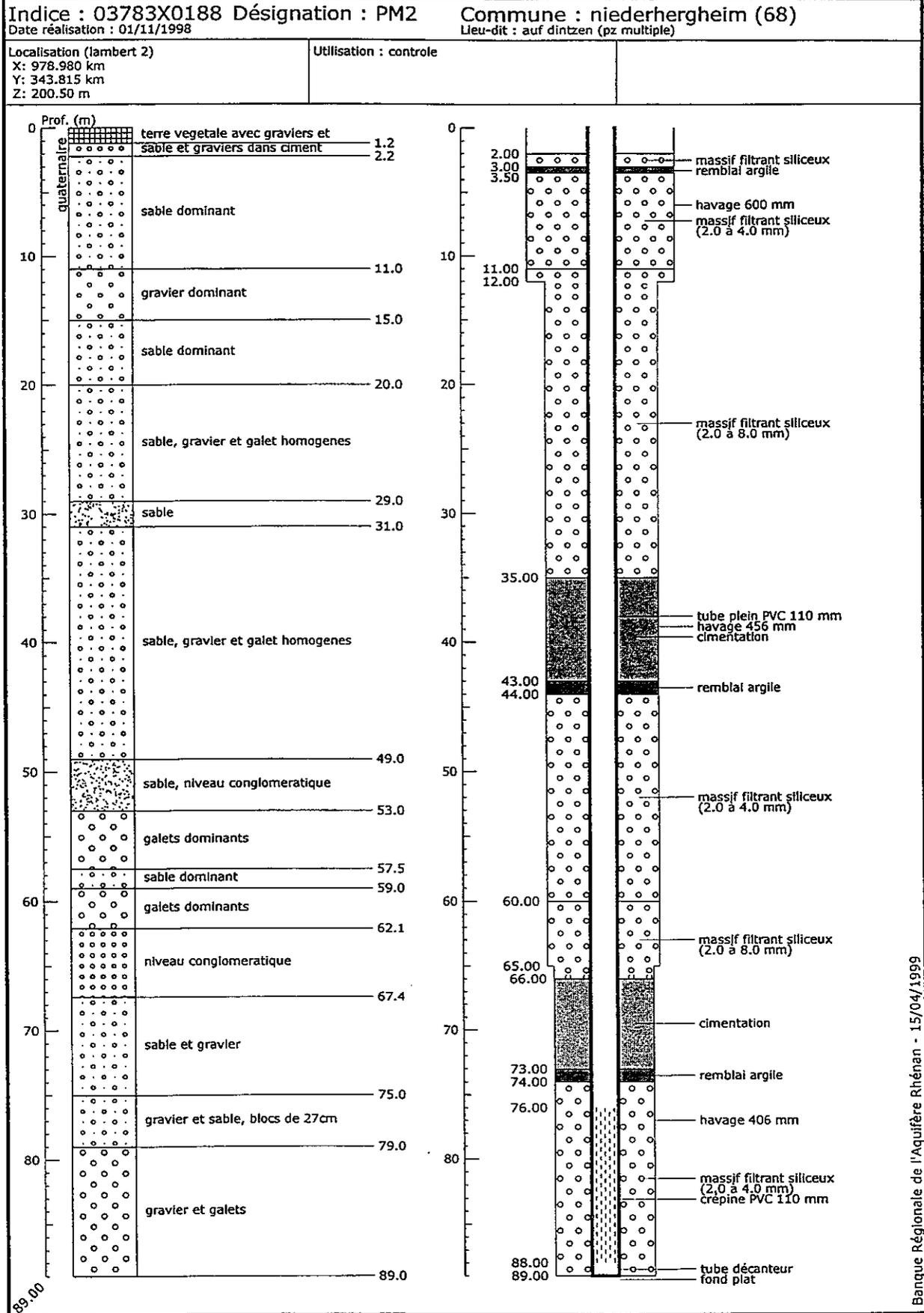




Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

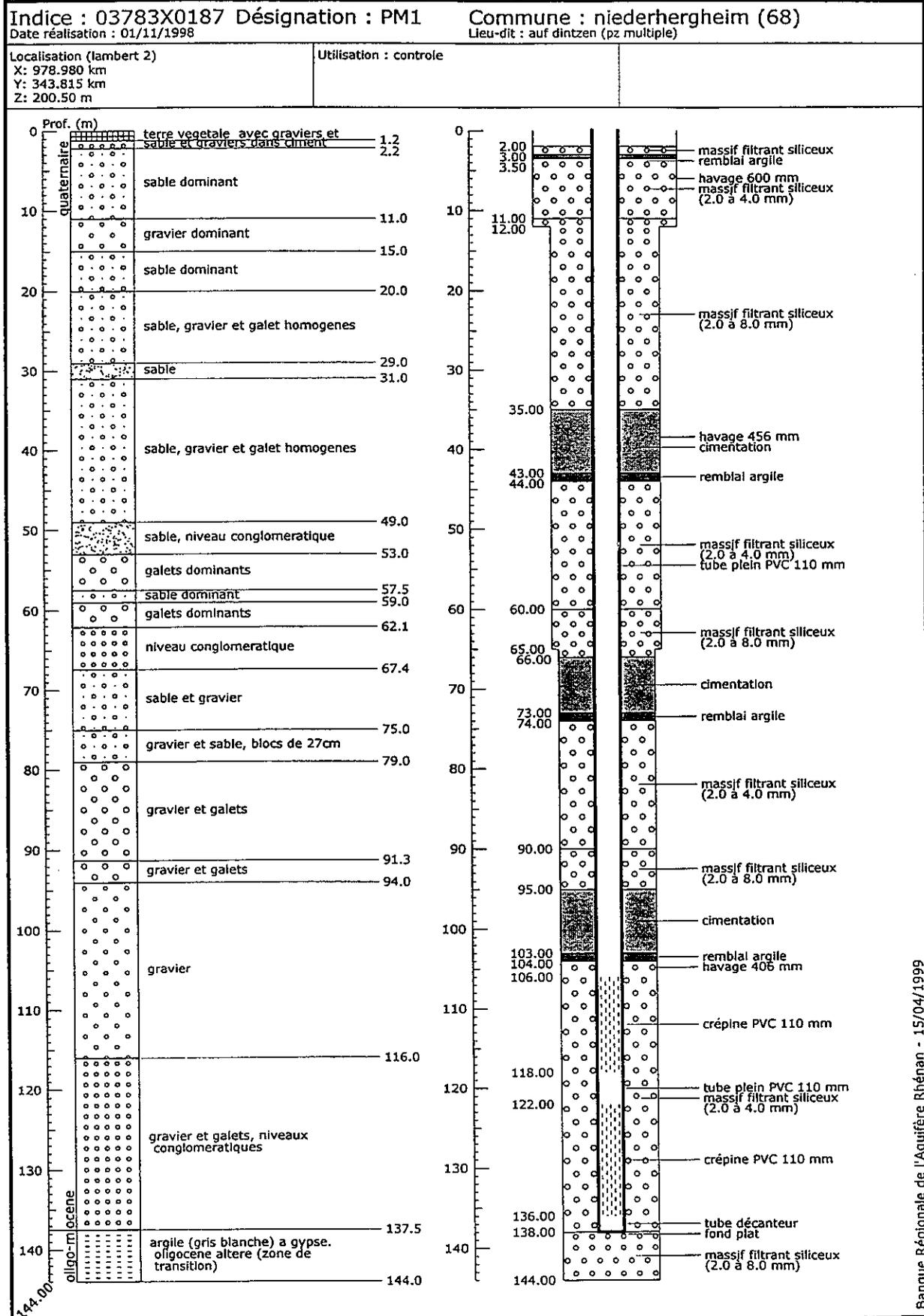


Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan



Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

Caractéristiques hydrogéochimiques et isotopiques de l'aquifère rhénan



Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan - 15/04/1999

Annexe 2 : **Résultats des diagraphies, secteur de** **Strasbourg**

Résultats des mesures débitométriques au micromoulinet.

HOLTZHEIM 272-2-513

| Filtre | profondeur | production |
|-------------------------------|---------------|------------|
| 1er | 13,5 - 15,0 m | oui |
| 2ème | 30,2 - 32,0 m | oui |
| 3ème | 47,0 - 48,5 m | peu |
| 4ème | 54,9 - 57,4 m | non |
| sable dans les eaux d'exhaure | | oui |

HOENHEIM 234-7-362

| Filtre | profondeur | production |
|-------------------------------|-----------------|------------|
| 1er | 14,0 - 15,5 m | oui |
| 2ème | 30,5 - 32,0 m | non |
| 3ème | 45,5 - 47,0 m | oui |
| 4ème | 60,5 - 62,0 m | oui |
| 5ème | 74,0 - 75,5 m | oui |
| 6ème | 91,0 - 92,5 m | très peu ? |
| 7ème | 113,0 - 114,5 m | non |
| sable dans les eaux d'exhaure | | très peu |

ILLKIRCH 272-3-978

| Filtre | profondeur | production |
|-------------------------------|---------------|------------|
| 1er | 13,1 - 14,5 m | oui |
| 2ème | 29,1 - 30,5 m | ? |
| 3ème | 44,0 - 45,5 m | oui |
| 4ème et après | > 45,5 m | ? |
| sable dans les eaux d'exhaure | | beaucoup |

Les 15 derniers mètres du fond sont apparemment comblés avec du sable.

WOLFISHEIM 272-2-543

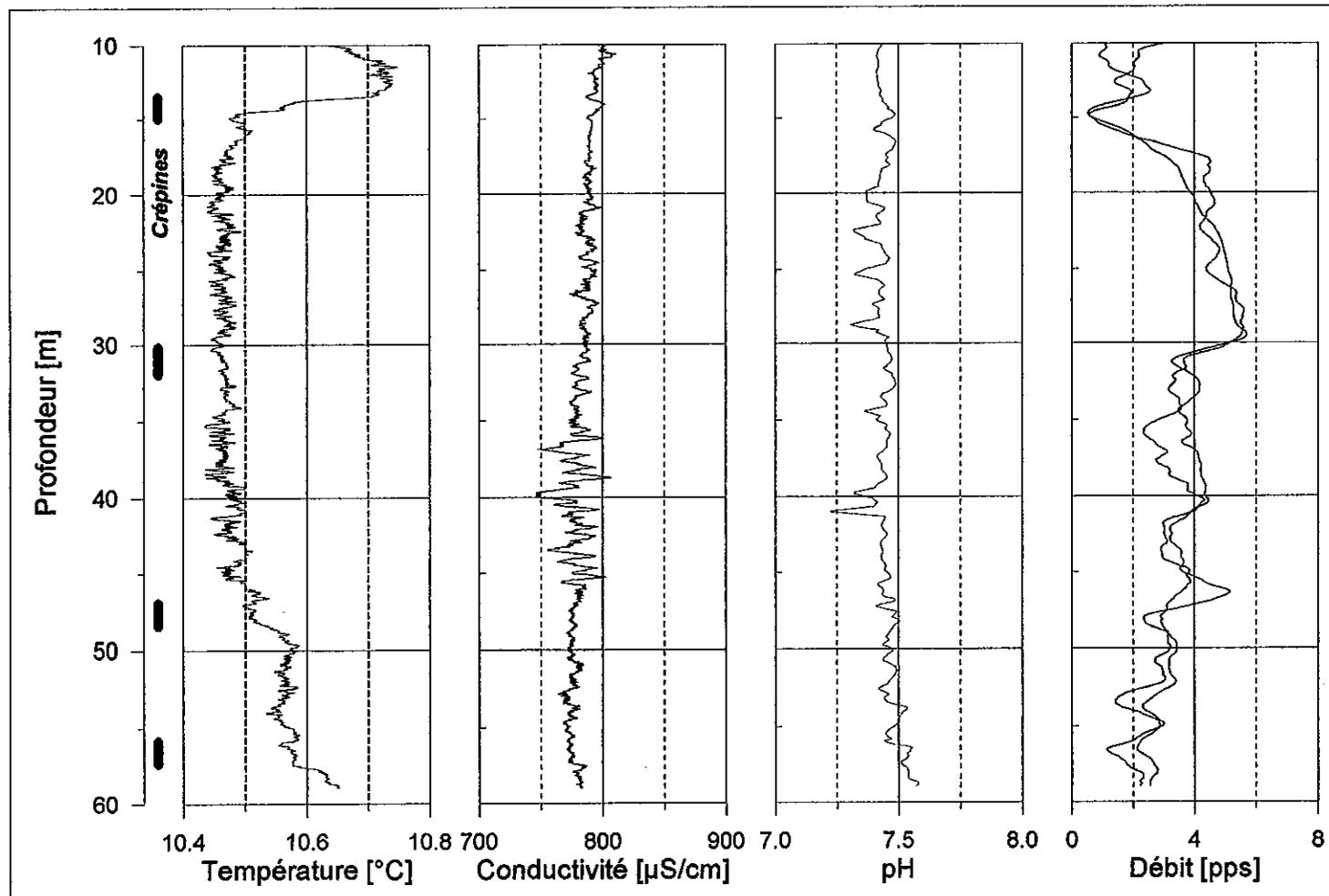
| Filtre | profondeur | production |
|-------------------------------|---------------|--------------------------|
| 1er | 14,5 - 16,0 m | oui avec apport de sable |
| 2ème | 31,4 - 33,0 m | oui |
| 3ème | 45,4 - 47 m | oui |
| sable dans les eaux d'exhaure | | oui |

PFULGRIESHEIM 234-6-185

| Filtre | profondeur | production |
|-------------------------------|---------------|------------|
| 1er | 47,0 - 49,0 m | peu |
| 2ème | 58,0 - 60,0 m | oui |
| 3ème | 80,0 - 82,0 m | oui |
| 4ème | 91,0 - 93,0 m | oui ? |
| sable dans les eaux d'exhaure | | non |

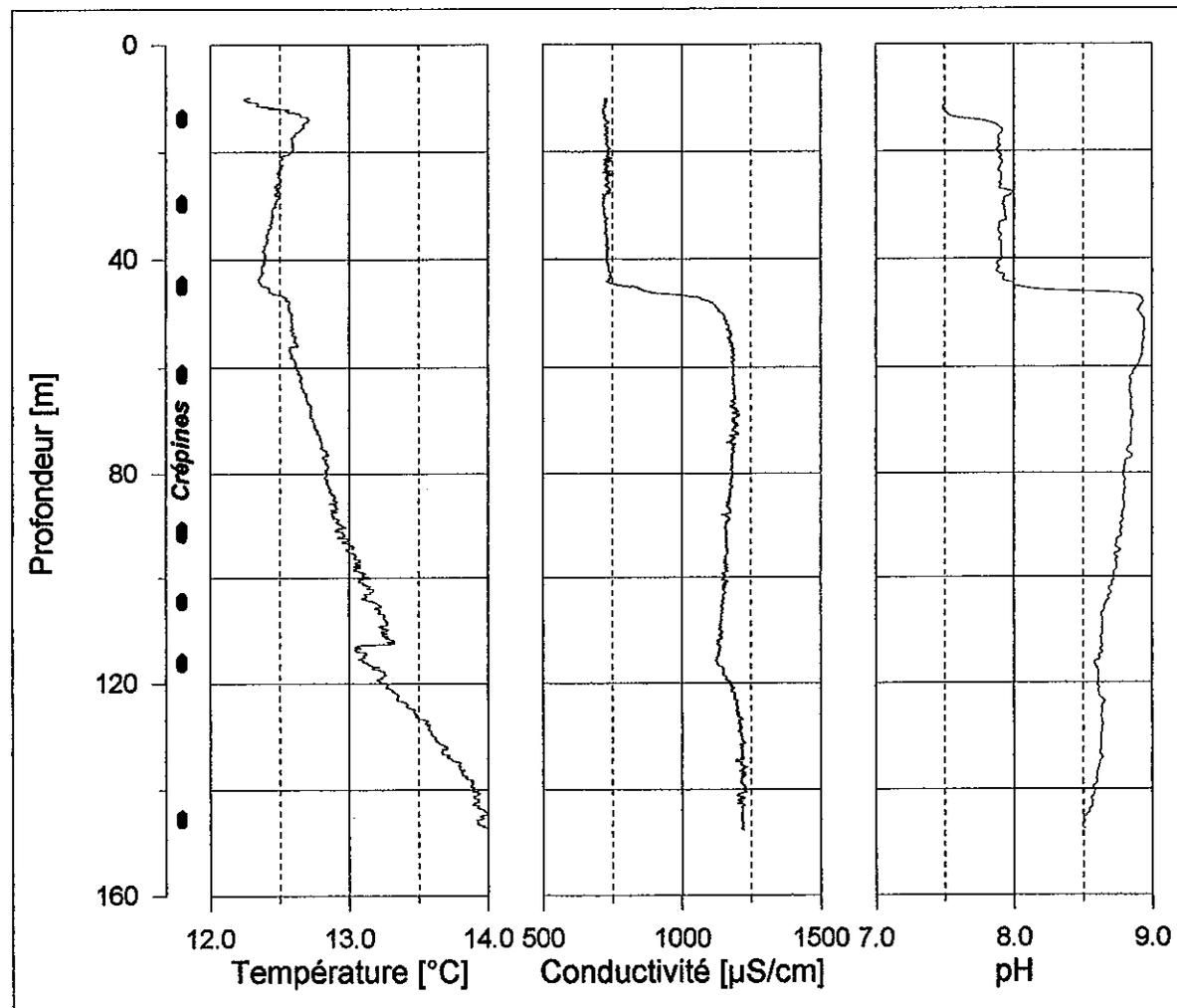
Forage Holtzheim

débit de pompage : 10m³



Résultats des diagraphies sous condition de pompage sur le forage Holtzheim

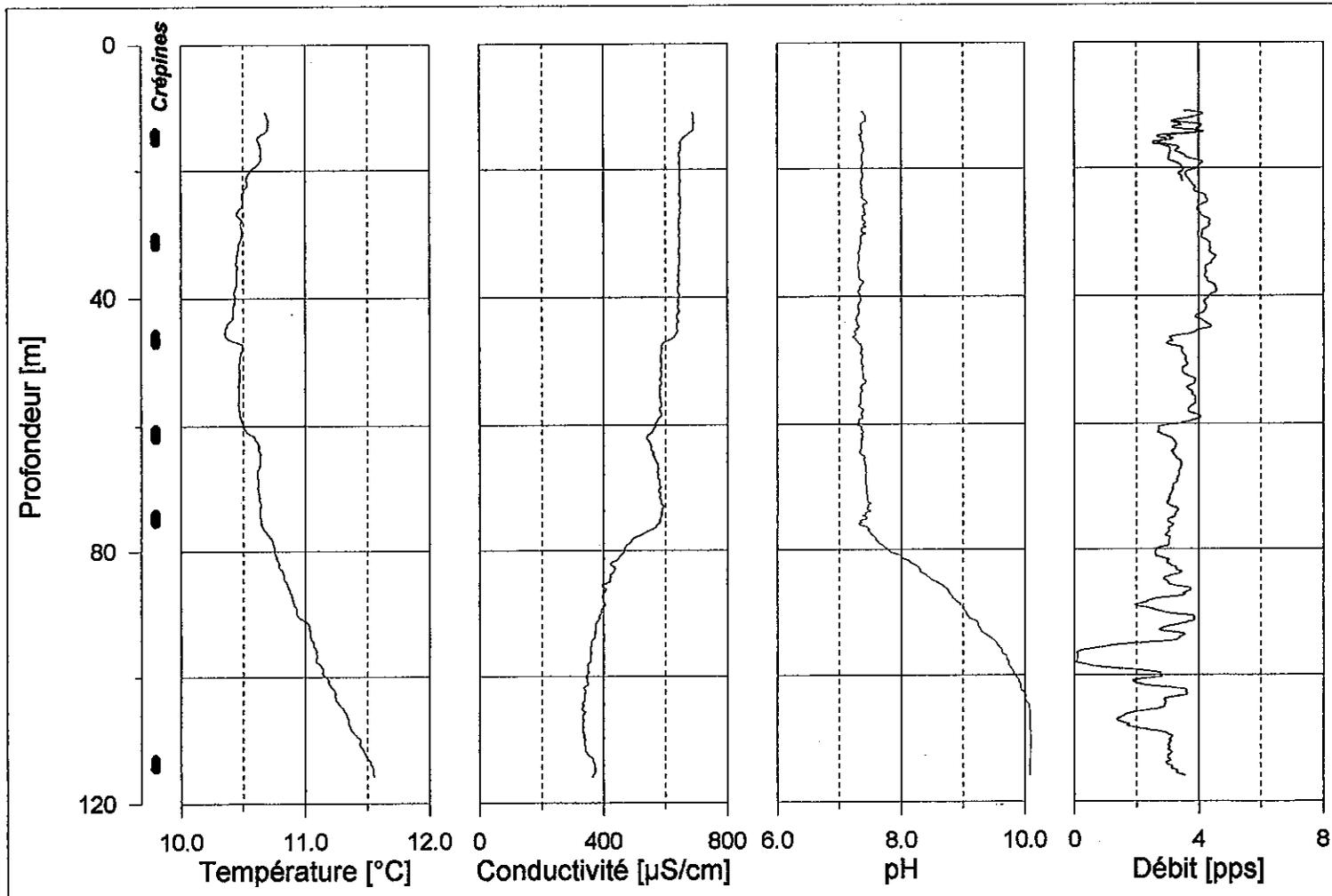
Forage Illkirch **débit de pompage : 10m³**



Résultats des diagraphies sous condition de pompage sur le forage Illkirch

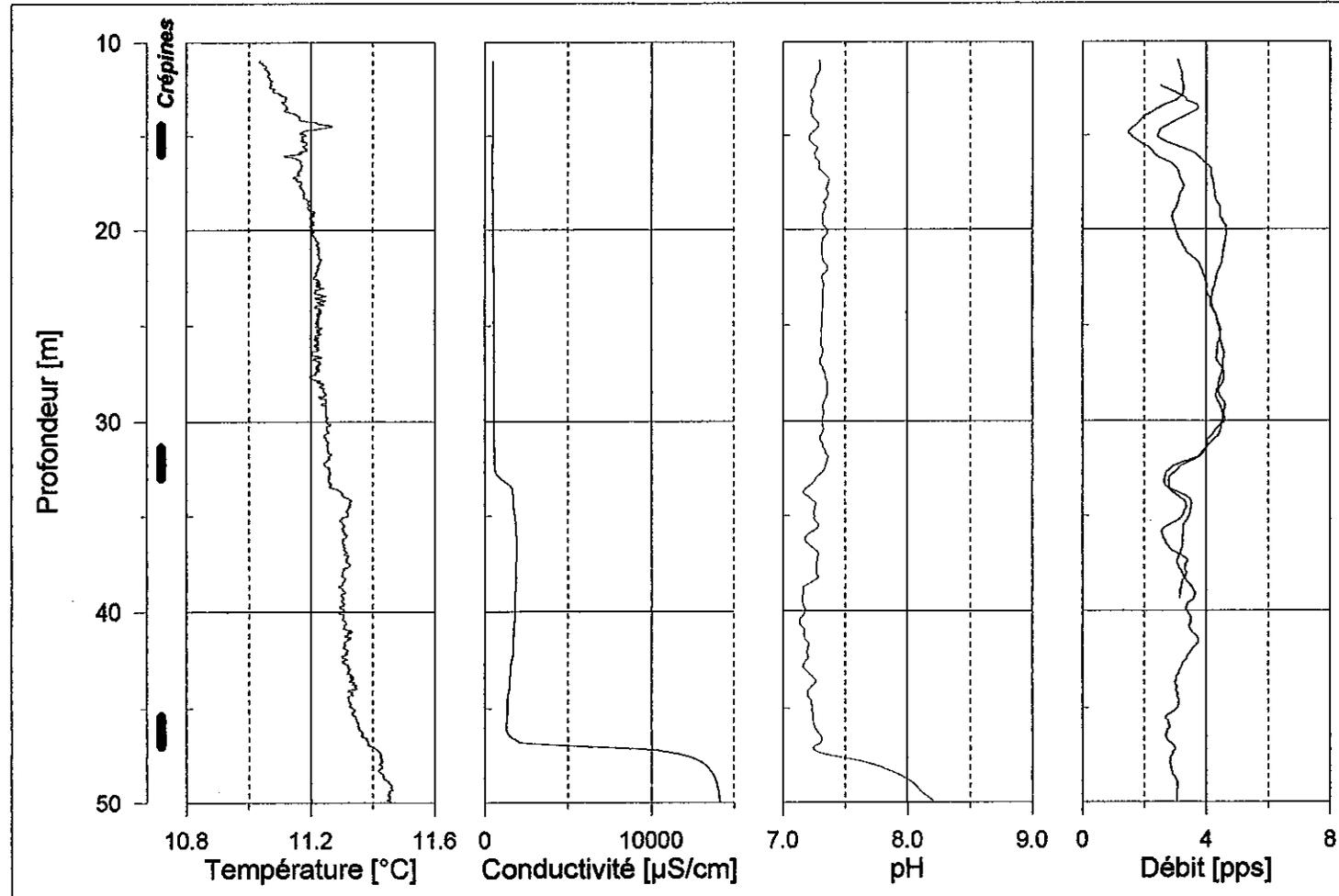
Forage Hoenheim

débit de pompage : 14,4 m³



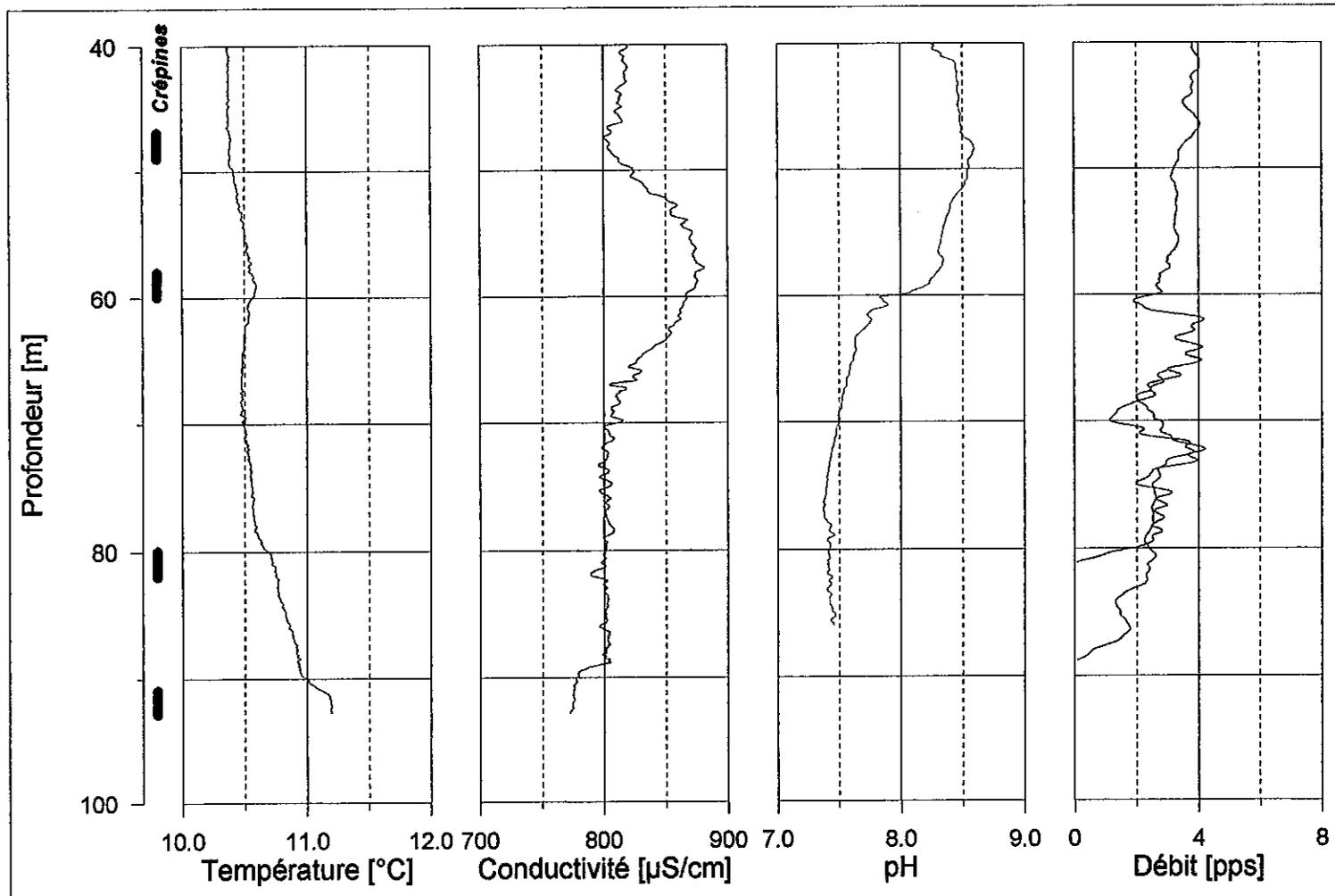
Résultats des diagraphies sous condition de pompage sur le forage Hoenheim

Forage Wolfisheim **débit de pompage : 19,8 m³**



Résultats des diagraphies sous condition de pompage sur le forage Wolfisheim

Forage Pfulgriesheim débit de pompage : 1,54 m³



Résultats des diagraphies sous condition de pompage sur le forage Pfulgriesheim

