



DOCUMENT PUBLIC

Étude du pourtour est de l'étang de Thau, phase II

Synthèse générale

VOLUME 4

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 1998-D-516

juin 2001
BRGM/RP-50789-FR





DOCUMENT PUBLIC

Étude du pourtour est de l'étang de Thau, phase II

Synthèse générale

VOLUME 4

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 1998-D-516

Doerfliger N., Ladouche B., Bakalowicz M., Pinault J.-L., Chemin P.

juin 2001
BRGM/RP-50789-FR



Mots clés : Hydrogéologie , Karst, Eaux thermales, Hydrochimie, Essais de traçage, Fonctions de transfert, Conflits d'usage, Gestion de la ressource, Étang de Thau, Balaruc-les-Bains, Languedoc-Roussillon.

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

Doerfliger N., Ladouche B., Bakalowicz M., Pinault J.-L., Chemin P. (2001) - Étude du pourtour est de l'étang de Thau, phase II. Synthèse générale. Volume 4. BRGM/RP-50789-FR, 71 p., 34 fig., 3 tabl., 2 photos.

© BRGM, 2001, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Suite à un incident survenu au cours de l'année 1993 sur l'alimentation en eau des thermes de Balaruc-les-Bains en terme de diminution de la température, les causes invoquées étaient l'effet induit par un pompage des eaux de la source sous-marine de la Vise dans l'étang de Thau. Les conditions hydrologiques du moment sont à prendre en considération, à savoir un étiage important, dans les causes de cet effet. Le secteur de Balaruc-les-Bains étant situé au sein d'un milieu naturel de convergence d'eaux provenant de divers systèmes souterrains et superficiels, il est nécessaire pour proposer une optimisation de la gestion de la ressource d'accroître la connaissance en terme de géométrie, de fonctionnement et d'interdépendance de ces réservoirs.

Dès 1995, le Conseil général de l'Hérault a initié un programme d'étude comprenant une synthèse hydrogéologique, une analyse socio-économique et une première phase d'études complémentaires élaborées en partenariat par la DIREN de Languedoc-Roussillon et le BRGM. La deuxième phase du programme d'études complémentaires qui s'est déroulée de 1999 à 2000 a pour objectif premier d'avancer dans la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes en présence et de proposer des modalités de gestion de la ressource en eau.

Le programme d'actions 1999-2000 est un projet financé par le Conseil général de l'Hérault, l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, la DDAF34 via des fonds FEDER ainsi que le BRGM. Il a compris une caractérisation géochimique et isotopique complémentaire en conditions hydrologiques de hautes eaux, une poursuite du suivi en continu des paramètres physiques sur des points d'eau de type sources et forages dans le but de comprendre l'organisation des écoulements et l'interdépendance des différents réservoirs (thermaux et karstiques), une définition de la géométrie des réservoirs souterrains et une élaboration d'un modèle géologique structural, un inventaire des phénomènes exokarstiques, la réalisation d'essais de traçage pour la mise en évidence de connexions hydrauliques. L'ensemble de ces données a fait l'objet de différents traitements dont l'interprétation conduit à la définition d'un schéma de fonctionnement des différents réservoirs et à la proposition d'un suivi de l'hydrosystème afin de prévenir les situations à risque.

L'ensemble de ces résultats est présenté à travers une série de 4 rapports :

- Volume 1 : « Définition du modèle géologique et inventaire des phénomènes karstiques ».
- Volume 2 : « Fonctionnement hydrogéologique du système karstique de Thau ».
- Volume 3 : « Caractérisation hydrochimique des réservoirs souterrains karstiques et thermaux ».
- **Volume 4 : « Synthèse générale ».**

Le présent rapport (volume 4) présente les principaux résultats de cette étude, en apportant des premiers éléments concernant la gestion de la ressource. Les principaux résultats sont :

- amélioration de la connaissance relative à la géométrie des formations calcaires du Jurassique moyen et supérieur aquifères ainsi que des délimitations du bassin d'alimentation du système karstique de Thau ;
- confirmation de la connexion hydraulique entre la Vène et la source d'Issanka ;
- détermination de l'ordre de grandeur du débit de la source de la Vise en période de basses eaux (50 à 100 l/s) ;
- mise en évidence à l'aide de l'interprétation des suivis en continu des points d'eau en terme de fonctions de transfert (analyse du signal) de l'importance relative de la pluie efficace, des eaux karstiques et de la composante thermique au fonctionnement hydrologique des points en fonction des différentes conditions hydrologiques ;
- distinction de différentes typologies d'eau souterraine possédant des signatures chimiques singulières et influencées par le réservoir thermal ;
- établissement d'un schéma conceptuel intégrant les résultats des interprétations hydrologiques et hydrochimiques ;
- reconstitution de la situation hydrologique de 1993 pour certains des points d'eau et proposition d'explication des phénomènes dits d'inversac de 1993 ;
- proposition d'un réseau de suivi et d'alertes pour gérer les situations à risque.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Contexte et démarche adoptée	11
2.1. Objectif et démarche adoptée	11
2.2. Formalisation de la démarche de l'étude	12
3. Présentation des études menées par le BRGM et la DIREN	13
3.1. Programme de travail.....	13
3.2. Structure du rapport.....	14
4. Synthèse des résultats	15
4.1. Caractéristiques des calcaires du bassin de Thau	15
4.1.1. Histoire géologique et série stratigraphique de référence	15
4.1.2. Structure et géométrie des calcaires	18
4.1.3. Organisation des écoulements souterrains.....	22
4.2. Fonctionnement hydraulique du bassin de thau	24
4.2.1. Fonctionnement hydraulique des calcaires.....	24
4.2.2. Fonctionnement du réservoir thermal.....	40
4.2.3. Interrelations hydrauliques entre les différents réservoirs.....	40
4.3. Caractéristiques et origines des eaux souterraines	49
4.3.1. Hydrochimie et analyses isotopiques comme outils de caractérisation des réservoirs	49
4.3.2. Synthèse des résultats	49
4.4. Conclusion du mode de fonctionnement hydrogéologique du système de Thau	52
5. Éléments d'explication de l'événement de 1993	55
5.1. Situation de captage de la source de la Vise.....	55
5.2. Ordre de grandeur du débit de la source de la Vise.....	55

5.3. Influence hydraulique sur la Vise.....	55
5.4. Conditions hydrologiques et météorologiques de 1993	58
5.5. Reconstitution par convolution de la charge hydraulique de certains points d'eau suivis en continu.....	59
5.6. Moteur des processus possibles d'inversac.....	62
6. Proposition de suivi de prévention des situations à risques hydrosystèmes souterrains du système de Thau	65
6.1. Dimensionnement d'un réseau de suivi	65
6.2. Interprétation des suivis, prévention des situations à risques.....	67
7. Conclusion	69
Bibliographie.....	71

Liste des figures

Fig. 1 - Série litho-stratigraphique de référence du bassin de Thau	17
Fig. 2 - Cadre structural du bassin de Thau	19
Fig. 3 - Coupe géologique située au nord de l'étang de Thau.....	20
Fig. 4 - Coupe géologique située au sud de l'étang de Thau	21
Fig. 5 - Délimitation du bassin d'alimentation en eau souterraine du système karstique de Thau qui a pour exutoires principaux les sources de La Vène, Issanka, La Vise, Ambressac et Cauvy.....	23
Fig. 6 - Piézométrie régionale de hautes eaux (1999) des calcaires du pli ouest de Montpellier.....	25
Fig. 7 - Piézométrie régionale d'étiage (2000) des calcaires du pli ouest de Montpellier.....	26
Fig. 8 - Équipement de la source de la Vise au niveau d'un des griffons d'un système de mesure de la charge hydraulique et de la conductivité électrique de l'eau.....	27
Fig. 9 - Évolutions temporelles de la charge de la Vise (exprimée par rapport au niveau de l'étang), de la température et de la conductivité en fonction de la pluviométrie à Sète.....	29
Fig. 10 - Schéma conceptuel de la source de la Vise.....	30

Fig. 11 - Localisation des différentes populations identifiées à partir des analyses chimiques autour du gouffre de la Vise (étang de Thau).....	31
Fig. 12 - Champ des températures simulées pour un débit de 50 l/s.	32
Fig. 13 - Champ des températures simulées pour un débit de 100 l/s.	33
Fig. 14 - Champ des températures simulées pour un débit de 1 000 l/s.	33
Fig. 15 - Évolutions temporelles du niveau piézométrique de la source d'Ambressac, de la température et de la conductivité de l'eau en fonction de la pluviométrie à Sète.....	35
Fig. 16 - Évolutions temporelles des niveaux piézométriques journaliers des sites Mas Charmant, Lecornec et S19-Gigean en fonction de la pluviométrie à Sète.....	37
Fig. 17 - Niveau piézométrique et conductivité – Source de Cauvy.....	39
Fig. 18 - Niveau piézométrique et conductivité – Forage P4.....	41
Fig. 19 - Niveau piézométrique et conductivité – Forage Algudo.....	42
Fig. 20 - Niveau piézométrique et conductivité – Forage Tennis.....	43
Fig. 21 - Niveau piézométrique et conductivité – Forage Good Year.....	44
Fig. 22 - Évolution de la piézométrie et de la conductivité du forage F3.....	45
Fig. 23 - Évolution de la piézométrie et de la conductivité du forage F4.....	46
Fig. 24 - Conceptualisation du fonctionnement hydrologique des sources karstiques de la presqu'île de Balaruc.....	48
Fig. 25 - Hiérarchisation qualitative de l'influence des eaux thermales sur le secteur de la presqu'île de Balaruc.....	49
Fig. 26 - Schéma simplifié de la structure des formations calcaires où circulent les eaux souterraines.....	53
Fig. 27 - Coupe schématique de l'organisation des écoulements souterrains karstiques et thermaux au sein du système karstique de Thau.....	54
Fig. 28 - Évolution des installations de captage des eaux douces de la source sous-marine de la Vise.....	56
Fig. 29 - Reconstitution de la contribution de la composante thermique et des variations piézométriques de l'eau du forage F4 (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert).....	60
Fig. 30 - Reconstitution des variations piézométriques de la source de Cauvy (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert).....	60
Fig. 31 - Reconstitution des variations piézométriques de l'eau du forage F3 (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert).....	61

Fig. 32 - Reconstitution des variations piézométriques de l'eau du forage P4 (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert)	61
Fig. 33 - Reconstitution des variations piézométriques de l'eau du forage Tennis (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert)	62
Fig. 34 - Schéma explicatif d'intrusion saline au niveau du réservoir thermal.....	63

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Tableau récapitulatif des épaisseurs et de la lithologie des formations représentées dans les coupes géologiques sous l'étang de Thau.	16
Tabl. 2 - Cumuls des hauteurs de pluie mensuelle et moyenne annuelle et inter annuelle mensuelle (période 1990-2000).	58
Tabl. 3 - Comparaison de la pluviométrie mensuelle de 1993, 1998, 1999 et 2000 par rapport à la pluviométrie inter annuelle mensuelle (période 1990-2000).	59

Liste des photos

Photo 1 - Crépine parallélépipède au niveau du griffon principal de la source sous-marine de la Vise (photo SMNLR).....	57
Photo 2 - Crépine reposant sur les anciennes bases de la cloche au niveau du griffon principal de la source sous-marine de la Vise (photo SMNLR).....	57

1. Introduction

Le secteur nord-est du bassin de Thau constitue un lieu naturel de convergence d'eaux provenant de différents hydrosystèmes de surface ou souterrains. Les eaux douces ainsi que les eaux d'origine thermale sont sollicitées pour des activités socio-économiques diverses (stations thermales, conchyliculture et pisciculture, alimentation en eau potable).

Un incident sur l'alimentation en eau des thermes de Balaruc-les-Bains au cours de l'année 1993 est à l'origine des études du pourtour est de l'étang de Thau : un étiage important et une intervention sur le système de pompage de la pisciculture GAEC « Poissons du soleil » captant la résurgence sous-marine de la Vise, ont eu pour effet une chute de température des installations thermales. On parlait déjà auparavant de l'existence de phénomènes dits d'inversac (pénétration d'eau salée (de l'étang ou de la mer ?) dans les aquifères) au niveau de la source sous-marine de la Vise.

L'optimisation de la gestion des ressources en eau afin d'éviter des situations de crise, nécessite une meilleure connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes présents ; cette dernière est nécessaire pour l'établissement de mesures de gestion. Un premier programme d'étude lancé par le conseil général s'est déroulée en 1995 avec une synthèse hydrogéologique (BRGM) et une analyse socio-économique (bureau d'études ASCA). Les conclusions de ces études ont mis en évidence les relations complexes entre les différents types d'eau en présence dans l'hydrosystème, et en particulier leurs origines diverses très souvent méconnues. De plus l'absence d'un mode de gestion de la ressource en eau souterraine du secteur d'étude a été clairement identifiée.

Suite à ces conclusions, un programme d'études complémentaires élaborées par la DIREN et le BRGM a été défini. Une première phase - Thau 1 - s'est déroulée en 1996-1997. Cette approche a été rendue nécessaire par le fait que les eaux souterraines de ce secteur sont classiquement considérées *a priori* par les différents usagers comme étant à l'origine de problèmes qualitatifs et/ou quantitatifs sur le fonctionnement de l'écosystème lagunaire. La deuxième phase de cette étude réalisée entre 1999 et 2000, fait l'objet de ce présent rapport.

2. Contexte et démarche adoptée

2.1. OBJECTIF ET DÉMARCHE ADOPTÉE

L'objectif principal de cette deuxième phase est de poursuivre l'objectif premier de l'étude, à savoir avancer dans la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes et de leurs interactions entre eux, à partir de la compréhension des paramètres influant sur le fragile équilibre des pôles « eau souterraine, eau thermale, eau de surface, y compris eau de mer », et ceci dans le but de fiabiliser la ressource en eau thermale.

Au final, l'objectif est de proposer des éléments de gestion de la ressource en eau souterraine intégrant les résultats des phases 1 et 2 de l'étude Thau. Ces éléments de gestion ne reposeront pas sur des modélisations numériques, mais sur des considérations qualitatives extraites de l'interprétation des données hydrochimiques, hydrauliques et géologiques.

La méthodologie retenue et mise en œuvre comprend plusieurs étapes successives ou parallèles qui sont les suivantes :

- (i) définition de la géométrie du réservoir et de ses limites à l'aide d'une étude géologique détaillée au niveau de la zone d'étude (contexte structural, observations de terrain, cartographie détaillée au niveau de la presqu'île de Balaruc-les-Bains, caractérisation de la karstification) ;
- (ii) caractérisation hydrogéologique de l'ensemble des calcaires aquifères du pli ouest de Montpellier et au niveau du système karstique de Thau (suivi piézométrique, suivi en continu d'un nombre de points sélectionnés) ;
- (iii) caractérisation des systèmes en terme de transit et de transfert en interprétant les chroniques d'hauteur d'eau, de conductivité et de température de différentes sources et forages thermaux ainsi que les données hydrochimiques et isotopiques d'une campagne de prélèvement ;
- (iv) un essai d'explication des phénomènes de 1993, et
- (v) une synthèse générale proposant des éléments pour un réseau de suivi et d'alerte d'un tel hydrosystème.

Les actions suivantes sont ainsi proposées afin d'atteindre les objectifs de cette étude :

- i) compléter les données géochimiques et isotopiques en période de hautes eaux, ne disposant que d'un set de données acquises au cours d'une période hydrologique de basses eaux, et les interpréter en terme d'origine des eaux et de fonctionnement, (BRGM) ;
- ii) poursuivre le suivi piézométrique de l'aquifère, des exutoires et de certains forages thermaux dans le but de comprendre les écoulements (BRGM et DIREN LRO) ;

- iii) préciser la géométrie des réservoirs souterrains à partir des données récentes de terrain et de géophysique et élaborer un modèle géologique de l'aquifère jurassique (BRGM) ;
- iv) inventorier les phénomènes karstiques afin de caractériser les conditions aux limites de l'aquifère : type d'infiltration diffuse ou non (BRGM) ;
- v) réaliser des essais de traçage dans le but de confirmer des hypothèses de connexions hydrauliques au sein de l'aquifère karstique (BRGM).

2.2. FORMALISATION DE LA DÉMARCHE DE L'ÉTUDE

Pour répondre aux problèmes auxquels doivent faire face le Conseil général de l'Hérault et d'autres administrations, concernant les conflits d'usage sur le pourtour est de l'étang de Thau, une convention d'appui de service public et scientifique a été signée entre le BRGM et le Conseil général de l'Hérault ainsi qu'entre la Direction régionale de l'environnement du Languedoc-Roussillon et le Conseil général de l'Hérault.

Le projet est financé par le Conseil général de l'Hérault, l'Agence de l'eau, la DDAF via des fonds FEDER et le BRGM, via sa dotation de recherche et de service public.

Le Conseil général de l'Hérault assure la maîtrise d'ouvrage du projet. Cette étude a été réalisée en partenariat avec la DIREN de Languedoc-Roussillon.

2. Présentation des études menées par le BRGM et la DIREN

3.1. PROGRAMME DE TRAVAIL

Le programme d'actions adopté pour l'étude du pourtour est de l'étang de Thau a débuté par une étude en 1995, « Synthèse géologique et hydrogéologique du bassin de Thau » (BRGM R38538) financée par le ministère de l'environnement dans le cadre du programme de protection des eaux souterraines (PPES) et par le ministère de l'Industrie (dotation de service public du BRGM).

Puis deux conventions ont été passées entre le Conseil général de l'Hérault et le BRGM, respectivement la DIREN-LR :

- 1996, convention n° 96/C2538 du 14 mars 1997,
- 1998, convention n° 96/C2538 du 8 octobre 1998.

Le contenu du programme d'actions pour le pourtour est de l'étang est le suivant :

- (1) inventaire de l'ensemble des prélèvements en eau à maille serrée sur la presqu'île de Balaruc et plus large, sur le reste du système aquifère ;
- (2) connaissance approfondie des origines, du fonctionnement et des circulations des eaux souterraines à l'aide des outils hydrochimiques et isotopiques en conditions hydrologiques différentes (hautes et basses eaux) ;
- (3) mise en place d'un suivi qualitatif et quantitatif sur des points d'eau en domaine continental ainsi que sur des sources en domaine lagunaire, telles que la source de la Vise et la source d'Ambressac. Suivi piézométrique sur un réseau de quelque 70 points et suivi en continu sur une petite dizaine de points d'eau (source et forages) ;
- (4) cartographie des arrivées d'eau douce dans l'étang et détermination des ordres de grandeur de débit de la source de la Vise ;
- (5) élaboration d'un modèle géologique et inventaire des phénomènes karstiques ;
- (6) démonstration de connexions hydrauliques par multi-traçages ;
- (7) synthèse des résultats ;
- (8) transfert de l'information vers l'ensemble des acteurs par bulletins d'information périodiques.

Les études se sont déroulées au cours des années 1995 à 2000. Les résultats ont fait l'objet de rapports préliminaires et rapports de phase, portant essentiellement sur une synthèse hydrogéologique et sur l'avancement des études.

L'ensemble des résultats et des interprétations de la phase II fait l'objet de trois rapports et de la présente synthèse. L'ensemble de ces rapports constitue le rapport final stipulé

par la convention de 1998. Les résultats de la phase II ont été interprétés à la lumière des résultats de la phase I.

3.2. STRUCTURE DU RAPPORT

L'ensemble des résultats du programme d'actions de la phase II de cette étude, est présenté à travers une série de 4 rapports y compris le rapport de synthèse :

- Volume 1 : « **Définition du modèle géologique et inventaire des phénomènes karstiques** ».

Le volume 1 de ce rapport définit le contexte géologique à partir des données existantes de type description de forages profonds, profils de géophysique et observations de terrains – cartographie détaillée au niveau de la presqu'île de Balaruc, description d'affleurements au niveau de carrières sur la montagne de Sète et identification de paléosurfaces. Un log stratigraphique de référence a été établi, ainsi que des cartes structurales et deux coupes transverses à l'étang. La géométrie des formations géologiques présentes de l'affleurement jusqu'au socle est présentée au travers de ces deux coupes et commentée. La mise en place de ces formations et leur karstification ont été synthétisées.

- Volume 2 : « **Fonctionnement hydrogéologique du bassin karstique de Thau** ».

Le volume 2 décrit le fonctionnement hydrogéologique du bassin karstique de Thau à partir de la délimitation de ce bassin, de l'interprétation de la piézométrie en conditions hydrologiques différentes au niveau d'un réseau de quelques 70 points, de l'interprétation du suivi de points d'eau en continu (sources et forages) en terme de fonctions de transfert, de la détermination du débit de la source sous-marine de la Vise et de l'interprétation des essais de traçage.

- Volume 3 : « **Caractérisation hydrochimique des réservoirs souterrains karstiques et thermaux** ».

Ce troisième volume présente l'ensemble de la démarche hydrochimique menée sur les hydrosystèmes (systèmes karstiques et réservoir thermal) du pourtour oriental de l'étang de Thau. Les méthodes et les différents traceurs caractéristiques des formations carbonatées sont rappelées dans un premier temps. Puis, l'ensemble des résultats obtenus pour les données hydrochimiques ainsi que l'interprétation qui en est faite sont présentés. La signification des variations des traceurs ou l'analyse des rapports d'éléments chimiques entre eux, permet d'en faire une interprétation en terme de fonctionnement et d'origine des eaux (aquifères karstiques, réservoir thermal, influence du socle).

- Volume 4 : « **Synthèse générale** ».

À l'exception du volume 4 et du volume 2, ces volumes représentent la contribution du BRGM à l'étude. Le volume 2 inclut la contribution de la DIREN Languedoc Roussillon ainsi que celle d'un partenaire sollicité par le BRGM pour traiter spécifiquement du calcul du débit de la source sous-marine de la Vise par modélisation (association GRADIENT). Le volume 4 résulte d'un travail commun DIREN Languedoc Roussillon et BRGM.

3. Synthèse des résultats

4.1. CARACTÉRISTIQUES DES CALCAIRES DU BASSIN DE THAU

La partie septentrionale et orientale du bassin de Thau constituant la zone d'étude, appartient à des paysages de garrigues essentiellement composés par le causse d'Aumelas au nord et la montagne de la Gardiole au sud ; ces deux ensembles calcaires du Jurassique moyen et supérieur sont séparés par le bassin de Montbazin-Gigean dont les sédiments de remplissage sont des marnes, grès, conglomérats et molasses de l'Oligocène et du Mio-Pliocène. Ces séries surmontent les formations calcaires du Jurassique supérieur et moyen.

La zone d'étude est comprise entre Pézenas à l'ouest, Agde et Sète au sud, Aumelas au nord et Montpellier à l'est.

4.1.1. Histoire géologique et série stratigraphique de référence

Les caractéristiques litho-stratigraphiques des formations géologiques constituant la zone d'étude au nord-est de la lagune de Thau, mettent en évidence deux formations carbonatées majeures du Jurassique supérieur et du Jurassique moyen. C'est au sein de ces formations que se développent les systèmes karstiques dont celui dit du bassin de Thau (tabl. 1 et fig. 1).

Au niveau du secteur d'étude, la puissance des séries du Jurassique moyen et supérieur est de plus de 1 000 m. Elle est constituée de quelque 400 m de calcaires et calcaires siliceux du Dogger inférieur compris entre deux niveaux marno-argileux, à leur base, les marnes aaléniennes et à leur sommet, les marnes du Bathonien. Quelque 300 m de calcaires du Callovien (Dogger supérieur) constituent une séquence de comblement ; cette dernière est surmontée par des marnes et calcaires argileux d'une puissance de 20 m appartenant à l'Oxfordien inférieur (Malm inférieur).

La nature du substratum sur lequel reposent les différentes formations litho-stratigraphiques évoquées ci-dessus, d'après les sondages profonds et des mesures de gravimétrie, pourrait être des schistes des Cévennes, des phyllades et des micaschistes. Le substratum est atteint sous le massif de la Gardiole à la cote de - 1 582 m alors qu'au niveau du sondage de Valensac sous le bassin de l'Hérault, le substratum n'est toujours pas atteint à la cote de - 4 572 m.

Les cotes du substratum données ou supposées à partir des informations fournies par les sondages pétroliers profonds, montrent l'existence d'une disharmonie profonde au niveau du toit du socle entre la Gardiole, l'étang de Thau et le bassin de l'Hérault ; cette disharmonie correspond à la zone de transfert sétoise décrite par Benedicto (1996).

Stratigraphie	Étages	Épaisseurs	Lithologie
Quaternaire	Alluvions récentes	1 à 2 m	Limons et sables
	Alluvions anciennes	1 à 2 m	Brèche et coquillier
	Quaternaire ancien	20 à 30 m	Calcaire lacustre, argile rouge, cailloutis
Tertiaire	Pliocène	40 + 10 = 50 m	Sable et limons, conglomérat
	Pliocène marin	100 m	Argile
	Miocène	50 à 60 m	Marne, molasse, sable
	Oligocène	190 à 500 m	Conglomérat., Grès, argile, calcaire lacustre
	Eocène	65 + (100 à 300) + 30 + 60 < 455 m	Conglomérat et (conglomérats, grès, argile, calcaire lacustre) + calcaire lacustre + conglomérats
Crétacé supérieur	Bégudo-Rognacien sup.	75 m	Conglomérat, grès, argile, calcaire lacustre
	Bégudo-Rognacien inf.	800 m	Grès, argile, calcaire lacustre
	Campanien sup.	200 m	Argile
	Campanien sup.	10 m	Grès, argile
Crétacé moyen	Bauxite	3 à 4 m	Argiles alumineuses ferrifères karstiques
Malm supérieur	Tithonien	150 m	Calcaire, dolomie
	Kimméridgien sup.	85 m	Calcaire, dolomie
	Kimméridgien inf.	100 m	Calcaire argileux
Malm inférieur	Oxfordien moyen et sup.	170 m	Séquence de comblement calcaire
	Oxfordien inf.	20 m	Marne, calcaire argileux
Dogger supérieur	Callovien	60 + (150 à 200) + 80 < 340 m	Séquence de comblement calcaire
	Bathonien sup.	100 m	Marne
Dogger inférieur	Bathonien inf.	200 m	Calcaire
	Bajocien	200 m	Calcaire siliceux
	Aalénien	150 à 200 m	½ inf. marne et ½ sup. calcaire
Lias marneux	Domérien à Toarcien	400 à 600 m	Marne
Lias calcaire	Carixien	< 100 m	Calcaire argileux et siliceux
	Sinémurien	< 100 m	Calcaire argileux
	Hettangien	250 m	Dolomie et évaporite
Trias et Rhétien	Trias et Rhétien	200 m	Grès argile dolomie et évaporites
Substratum			Schistes à pinite au sondage la Gardiole

Tabl. 1 - Tableau récapitulatif des épaisseurs et de la lithologie des formations représentées dans les coupes géologiques sous l'étang de Thau.

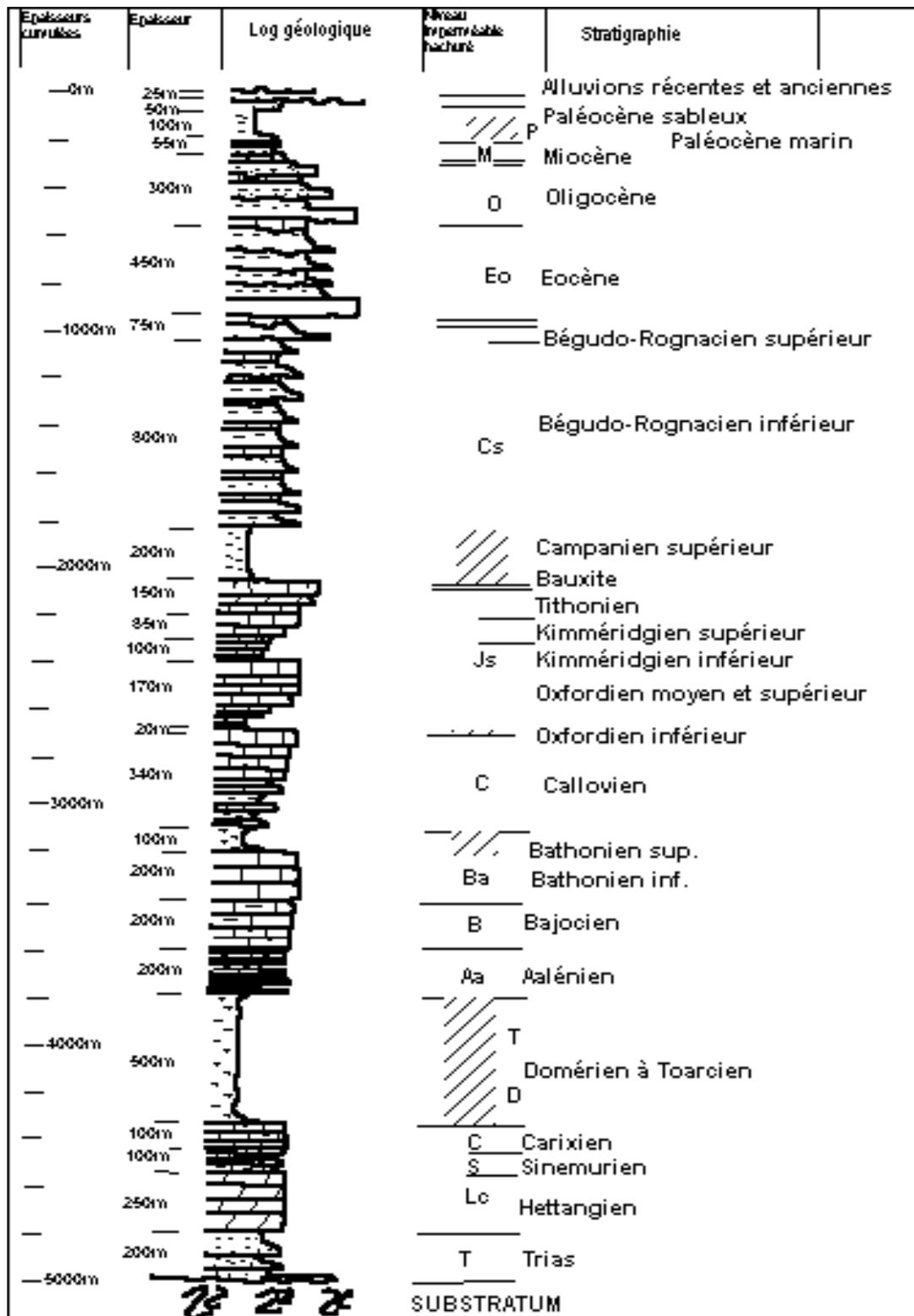


Fig. 1 - Série litho-stratigraphique de référence du bassin de Thau.

4.1.2. Structure et géométrie des calcaires

Le modèle géométrique et structural des formations carbonatées présentes autour de l'étang de Thau est piloté par un système de rampes et paliers qui affectent toute la série sédimentaire. La géométrie de l'ensemble des formations sédimentaires résulte de la phase compressive pyrénéenne à l'Éocène (35-50 Ma). L'ensemble est repris dans un mécanisme de blocs basculés qui se mettent en place, au niveau régional au Miocène (25-8 Ma) ; cette mise en place correspond à la formation du bassin de Montbazin-Gigean.

Les formations carbonatées du Jurassique supérieur totalisent une épaisseur de quelque 350 m, celles du Jurassique moyen de 500 m jusqu'à la base du Callovien. D'ouest en est, ces formations sont continues au niveau du causse d'Aumelas jusqu'au niveau de Loupian, où elles sont affectées par un accident majeur de socle. Deux autres accidents de socle affectent les séries entre l'étang de Thau et le massif de la Gardiole.

L'ensemble de la zone d'étude est compris entre des accidents tectoniques majeurs, au nord le chevauchement de Montpellier et au sud la faille de Nîmes. La zone d'étude comprend une succession d'anticlinaux et de synclinaux affectés par le style tectonique de rampes et paliers. Le causse d'Aumelas est bordé au nord et au sud-ouest au niveau de la montagne de la Moure par un anticlinal ; le prolongement de ce dernier vers le nord-est est affecté par une faille. Le synclinal principal du secteur d'étude est le synclinal situé au niveau du fossé de Montbazin-Gigean. Ce synclinal est séparé par une faille bordant la montagne de la Gardiole sur son versant occidental, la montagne de la Gardiole étant un anticlinal (fig. 2).

Si au niveau de la coupe nord passant à la hauteur de Balaruc-les-Bains, on peut estimer que le mur des calcaires du Kimméridgien atteint environ - 500 m, il en n'est pas de même au niveau de la coupe sud ; le Jurassique supérieur étant situé entre - 1 000 m et - 1 300 m. L'ensemble structural est fortement marqué par un approfondissement des structures du nord-est vers le sud-ouest, qui correspond à l'existence d'une disharmonie au niveau du toit du socle entre la Gardiole, l'étang de Thau et le bassin de l'Hérault (fig. 3 et 4).

La structure en rampes-paliers donne lieu à des rejets plus ou moins importants au niveau des accidents principaux ; les formations aquifères ne sont pas pour autant discontinues, dans la mesure où ces accidents ne jouent pas le rôle de barrière hydraulique. Les connexions hydrauliques mises en évidence par essais de traçage entre le causse d'Aumelas et la source d'Issanka, ainsi que la localisation de la source de la Visé laissent penser que ces accidents sont à la faveur des circulations d'eau souterraine.

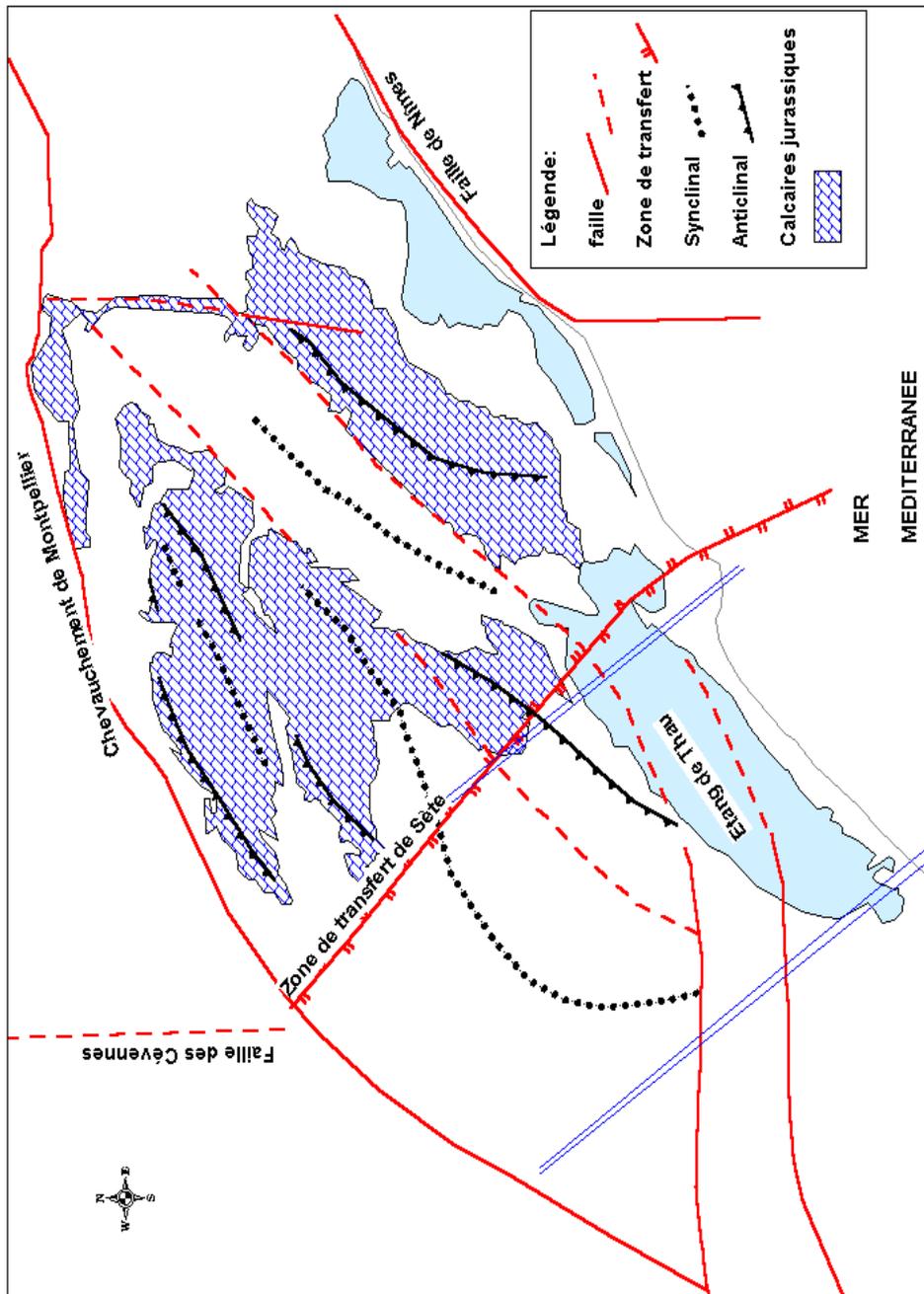


Fig. 2 - Cadre structural du bassin de Thau.

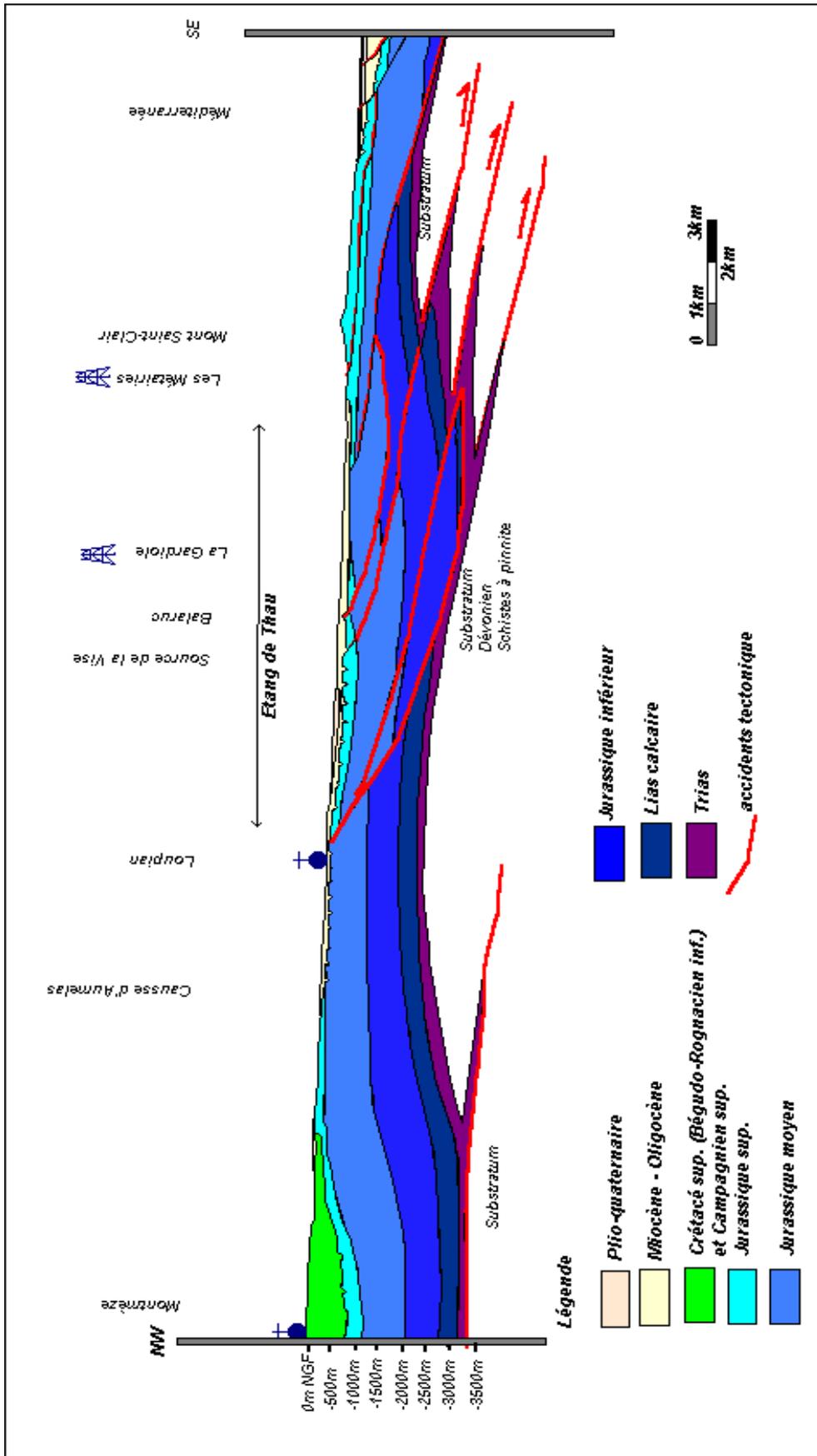


Fig. 3 - Coupe géologique située au nord de l'étang de Thau.

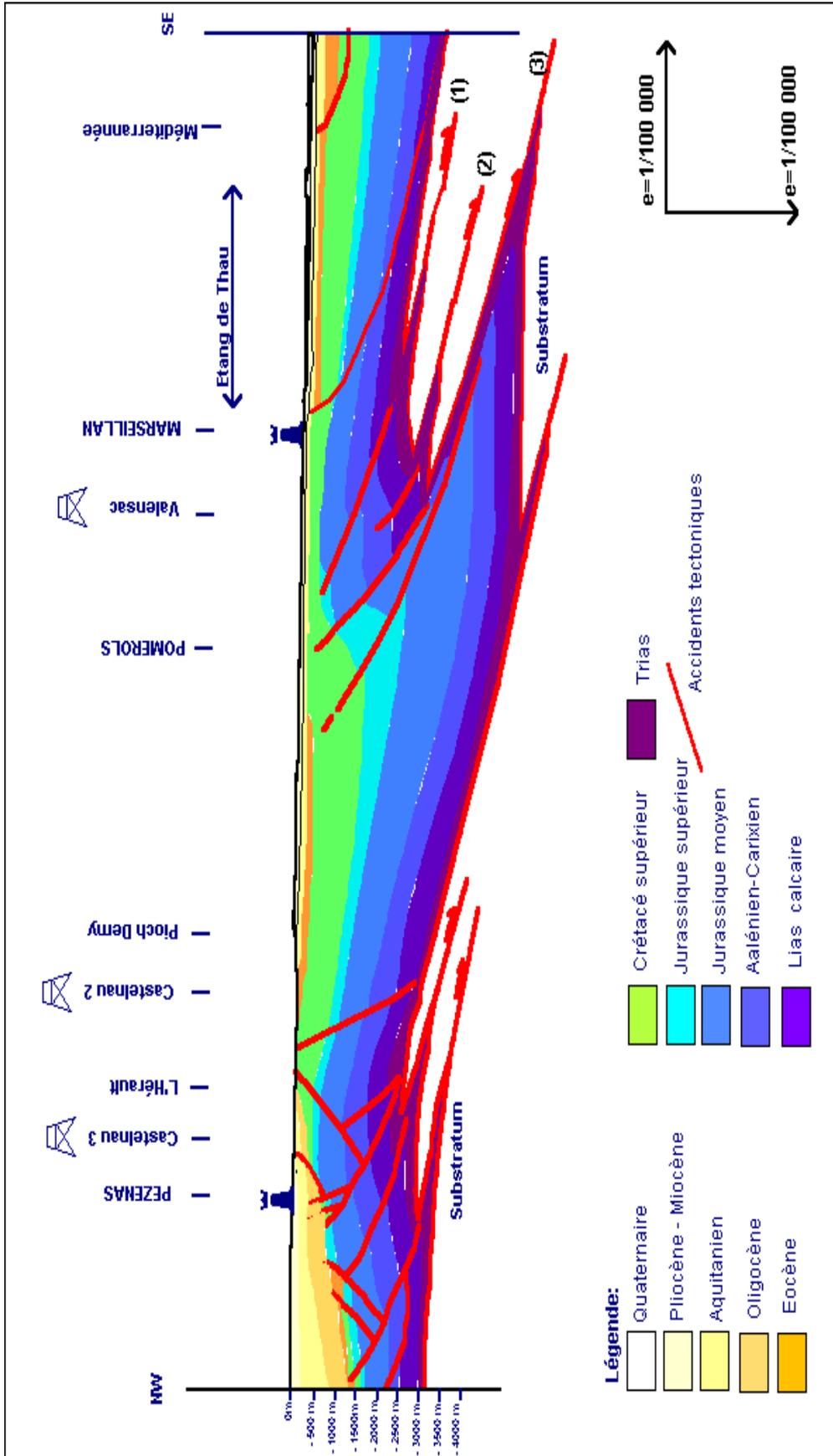


Fig. 4 - Coupe géologique située au sud de l'étang de Thau.

4.1.3. Organisation des écoulements souterrains

a) Délimitation du bassin d'alimentation

Différentes sources à caractère karstique, manifestations de présence d'eau souterraine, ont été identifiées au sein des formations calcaires appartenant au pli ouest de Montpellier et à la montagne de la Gardiole. S'il n'est pas possible d'identifier pour chacune des sources leur bassin d'alimentation propre au vu des relations hydrauliques prouvées ou supposées qui existent entre certaines d'entre elles, le bassin d'alimentation d'un système karstique unique, dit de Thau, a été délimité à partir des éléments géologiques (lithologie et structure) et hydrogéologiques (essais de traçage, axes d'écoulements à partir de cartes de piézométrie régionale en hautes et en basses eaux). Les systèmes karstiques voisins tels qu'à l'ouest le bassin de Villeveyrac et à l'est la partie orientale de la montagne de la Gardiole et de la Mosson ne peuvent fournir des limites sur lesquelles celles du système de Thau viendraient se caler ; leur structure et fonctionnement ne sont pas bien connus. Les eaux du bassin d'alimentation du système karstique de Thau circulent dans les calcaires après s'être infiltrées suite aux précipitations pour ressortir au niveau d'émergences multiples (sources de la Vène, d'Issanka, de Cauvy, d'Ambressac et de la Vise). Ces émergences ont la particularité d'être sur des axes d'écoulement préférentiel et/ou de converger en direction de l'extrémité nord-est de l'étang de Thau.

La superficie du bassin d'alimentation du système karstique de Thau occupe quelque 200 km². Le système karstique comprend une partie non carbonatée dans sa partie amont, drainée par des écoulements de surface, le Haut Coulazou, alimentant des pertes au contact des calcaires du causse d'Aumelas. Il est d'orientation nord-sud ; il englobe la partie centrale du causse d'Aumelas, la montagne de la Moure, à l'exception de sa partie occidentale, la partie sud-ouest du fossé de Montbazin-Gigean, et l'extrémité sud de la Montagne de la Gardiole. La plaine de Montbazin-Gigean est traversée par la limite dans sa partie médiane (fig. 5).

b) Piézométrie de hautes et de basses eaux

L'interprétation des suivis de l'évolution des niveaux piézométriques de l'aquifère karstique du pli ouest de Montpellier, relevés manuellement mensuellement depuis 1997 et bimensuellement depuis septembre 1999 a permis d'identifier trois secteurs hydrogéologiques :

- la montagne de la Moure et le causse d'Aumelas ;
- la montagne de la Gardiole ;
- le réservoir thermal au niveau de la presqu'île de Balaruc-les-Bains.

À noter qu'un compartimentage des écoulements au sein du karst peut être supposé dans la partie haute du bassin d'alimentation, alors qu'à proximité du niveau de base imposé par l'étang, au niveau de la presqu'île de Balaruc-les-Bains notamment, il existe une continuité hydraulique. La présence d'accidents tectoniques dans le secteur est de l'étang de Thau peut localement faire barrière aux écoulements souterrains.

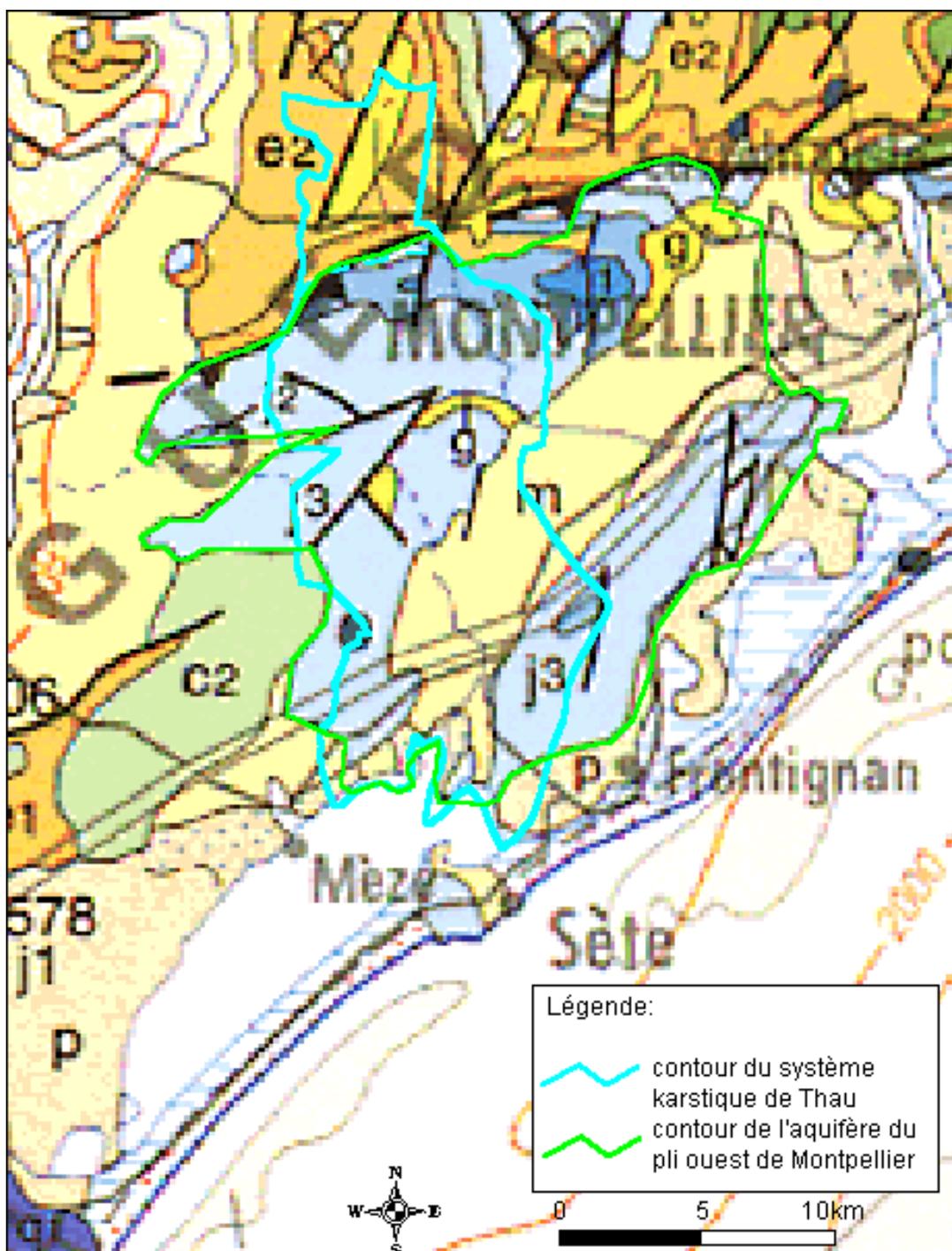


Fig. 5 - Délimitation du bassin d'alimentation en eau souterraine du système karstique de Thau qui a pour exutoires principaux les sources de La Vène, Issanka, La Vise, Ambressac et Cauvy.

L'écoulement général de la nappe au sein des calcaires du pli ouest de Montpellier s'organise selon une direction NW-SE. Un axe de drainage apparaît entre la source de la Vène et la source d'Issanka (fig. 6 et 7). À noter que globalement les directions d'écoulement générales mises en évidence sur les différentes cartes piézométriques ne varient pas en fonction des conditions hydrologiques.

c) Connexion hydraulique et essais de traçage

L'axe de drainage entre la source de la Vène et la source d'Issanka a été confirmé par un essai de traçage qui a mis en évidence une connexion hydraulique avec transit rapide au niveau des calcaires sous le bassin de Montbazin-Gigean. Plus des trois quarts de la masse injectée de traceur à la source de la Vène sont restitués à Issanka ; la restitution de la masse restante sur les points situés en aval hydraulique est plus difficile à identifier au vu des faibles concentrations. Ainsi la connexion avec la source de la Vise n'a pas pu être vérifiée. Le traceur injecté au niveau d'un forage sur la presqu'île de Balaruc n'a pas été retrouvé au niveau des forages thermaux et des sources de Cauvy, Ambressac et de la Vise.

4.2. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU BASSIN DE THAU

4.2.1. Fonctionnement hydraulique des calcaires

Dans le cadre de la phase I de cette étude, l'interprétation des données hydrochimiques des points d'eau prélevés au niveau des sources et des forages thermaux a montré l'existence de phénomènes de mélange entre les eaux souterraines, les eaux thermo-minérales et l'eau salée. De plus, si le suivi régulier au pas de temps mensuel des niveaux d'eau de l'aquifère du réseau piézométrique riche de quelque 70 points a permis de montrer le fonctionnement saisonnier de l'aquifère, il a permis de sélectionner quelques points intéressants de suivre en continu.

Un suivi piézométrique à un pas de temps régulier dans un milieu karstique ne permet que d'indiquer le comportement général de l'aquifère voire de distinguer des points singuliers de propriétés hydrauliques différentes. Afin d'analyser et de caractériser le fonctionnement hydrologique des points d'eau représentatifs des différents réservoirs, nous avons sélectionné quelques points d'eau de type forage et procédé à leur équipement en matériel d'acquisition de données en continu (niveau d'eau, conductivité et température).

Parmi les points suivis en continu, sept points ont été suivis par la DIREN du Languedoc Roussillon (la source Cauvy, les forages F3, F4, P4, Algudo, Tennis et Good Year) et cinq points par le BRGM (les sources de la Vise et d'Ambressac, forages S19, Le Mas Charmant et Lecornec).

Une interprétation qualitative de l'évolution temporelle des paramètres suivis aux sources de la Vise, de Cauvy, Ambressac et des forages thermaux, notamment, permet de mettre en évidence des phénomènes pouvant être récurrents d'une année sur l'autre.

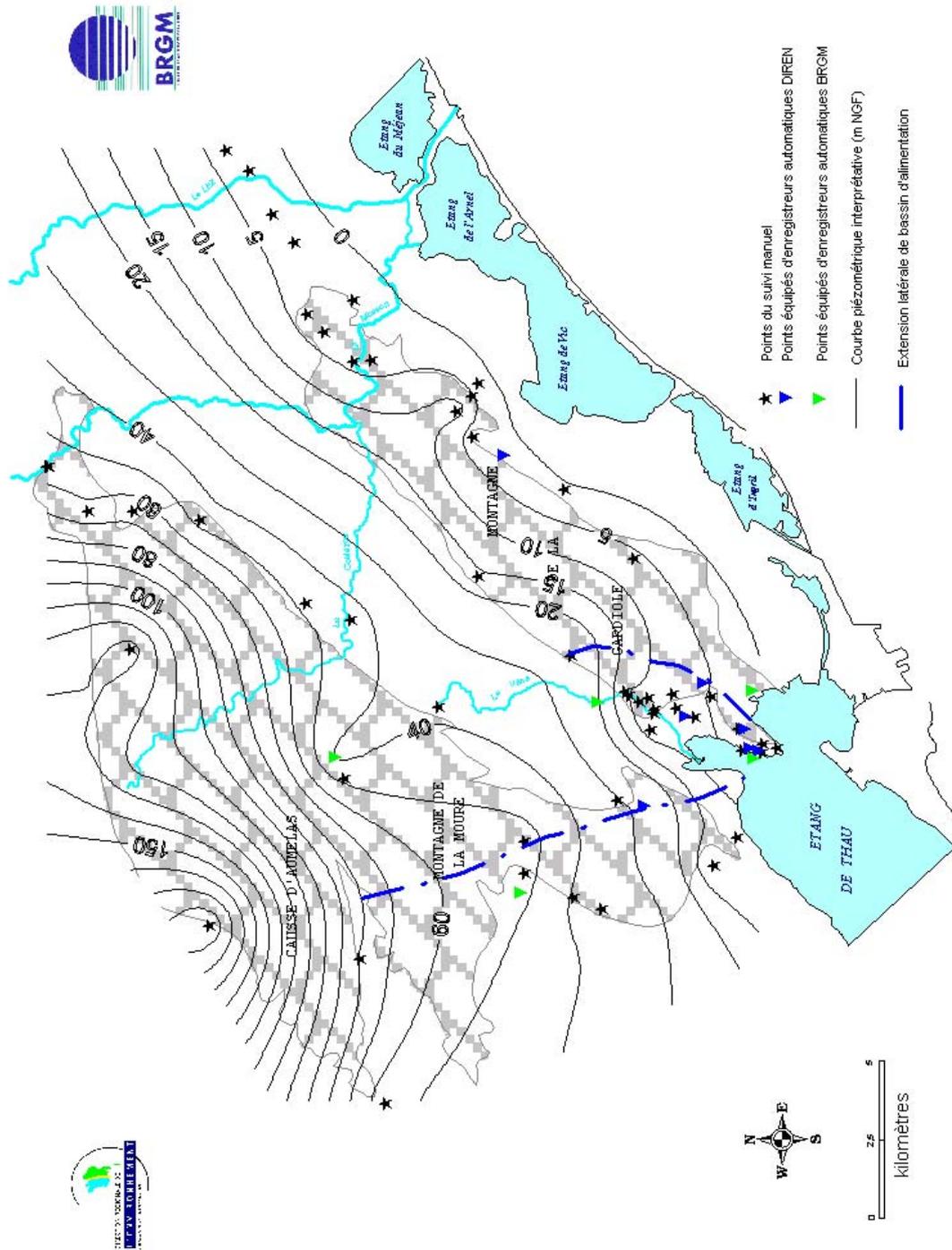


Fig. 6 - Piézométrie régionale de hautes eaux (1999) des calcaires du pli ouest de Montpellier.

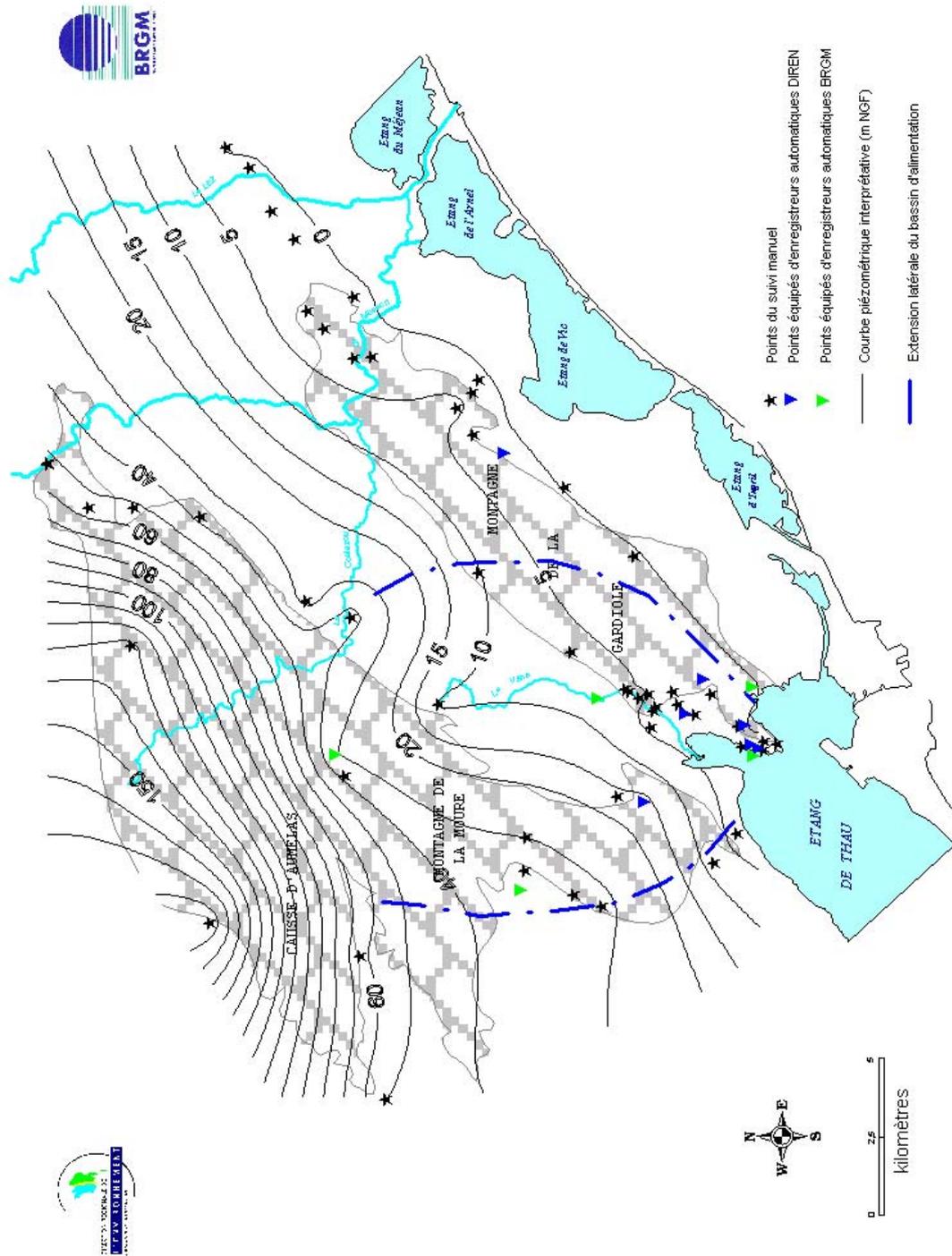


Fig. 7 - Piézométrie régionale d'étiage (2000) des calcaires du pli ouest de Montpellier.

• Source de la Vise (BRGM)

Équipement et suivi

La source de la Vise, située sur la commune de Balaruc-les-Bains à une bathymétrie de - 30,40 m, a été équipée en 1998 d'un système d'acquisition de données en continu pour les paramètres physiques suivants : conductivité électrique de l'eau, température et hauteur d'eau. Le dispositif de mesure installé au niveau du GAEC pisciculture « Poissons du Soleil » permet de suivre en continu, au pas de temps bi-horaire, la charge de la source, le niveau de l'étang, la différence de charge entre les deux, la conductivité et la température de l'eau (fig. 8).

La source de la Vise comprend une émergence principale au fond du gouffre et quelques petits griffons situés sur les parois ; c'est l'un de ces derniers qui a fait l'objet d'un microcaptage à l'aide d'un tube PVC de diamètre de 500 mm auquel est relié un tuyau de PET d'une longueur cumulée de 180 m (100 m et 80 m avec un raccord) fixé tout au long de la conduite d'eau servant à l'alimentation en eau de la pisciculture « Poissons du Soleil ».

Le niveau de l'étang constitue une des conditions aux limites du système aquifère karstique qui contribue à la charge se situant au niveau de la source. Afin de mesurer d'éventuelles inversions de charge entre celle de la source et de l'étang, qui peut être à l'origine des phénomènes dits d'inversac, le niveau de l'étang est enregistré simultanément en continu à côté du puits de mesure.

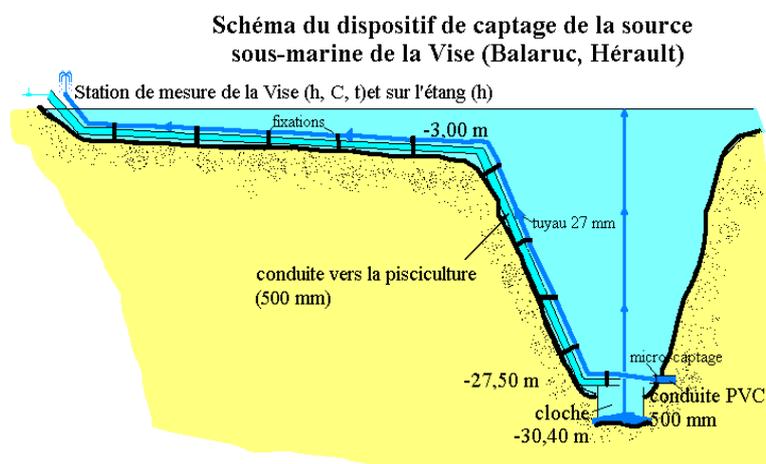


Fig. 8 - Équipement de la source de la Vise au niveau d'un des griffons d'un système de mesure de la charge hydraulique et de la conductivité électrique de l'eau.

Les évolutions temporelles de la différence de charge, de la température et de la conductivité de l'eau de la Vise en fonction de la pluviométrie montrent leur complexité à la figure 9.

La chronique de la charge nous renseigne sur les variations saisonnières des conditions de charge de l'aquifère au voisinage de l'exutoire sous-marin. On observe une diminution relativement brutale de la charge de l'aquifère au cours du printemps et une remontée rapide à l'automne. Ce phénomène est récurrent d'une année sur l'autre. La diminution de la charge se produit dès le début du mois de juin en 1998, vers la fin du mois de juin en 1999 et débute dès le mois de mars pour l'année 2000. La remontée de la charge semble toujours s'observer à la fin octobre. On montre par ailleurs, que la charge de la Vise ne semble pas réagir aux épisodes de pluie.

Si l'on excepte les périodes pendant lesquelles le tuyau était rompu, on observe une variabilité temporelle de la conductivité de l'eau de la Vise. On montre notamment que la conductivité augmente suite aux épisodes de pluie.

Détermination du débit de la source de la Vise

Une campagne ayant pour objectif la caractérisation et la cartographie détaillée des arrivées d'eau douce au fond de l'étang de Thau dans le secteur de la presqu'île de Balaruc, a été effectuée les 16, 17 et 18 mars 1999. Elle visait en particulier à caractériser l'impact de l'émergence de la source sous-marine de la Vise sur l'étang de Thau en quantité et qualité. Cette campagne a compris des mesures de la conductivité/salinité et de la température le long de profils et des prélèvements d'eau en subsurface et en profondeur ont été effectués.

Les mesures de température ont servi des données de base pour modéliser le flux thermique de la source de la Vise et ainsi déterminer l'ordre de grandeur du débit de la source pour les conditions expérimentales.

Données expérimentales et organisation des « masses d'eau au niveau de la source de la Vise »

La cartographie des venues d'eau au fond de l'étang dans un périmètre proche de celui de la source de la Vise à l'aide de profils physico-chimiques effectués selon une grille de répartition spatiale permet de montrer que des minimums de conductivité associés à des maximums de température sont localisés de part et d'autre du point situé au droit du gouffre de la Vise. Ces panaches d'eau plus chaude et moins salée sont à attribuer aux arrivées d'eau douce et chaude de la source de la Vise.

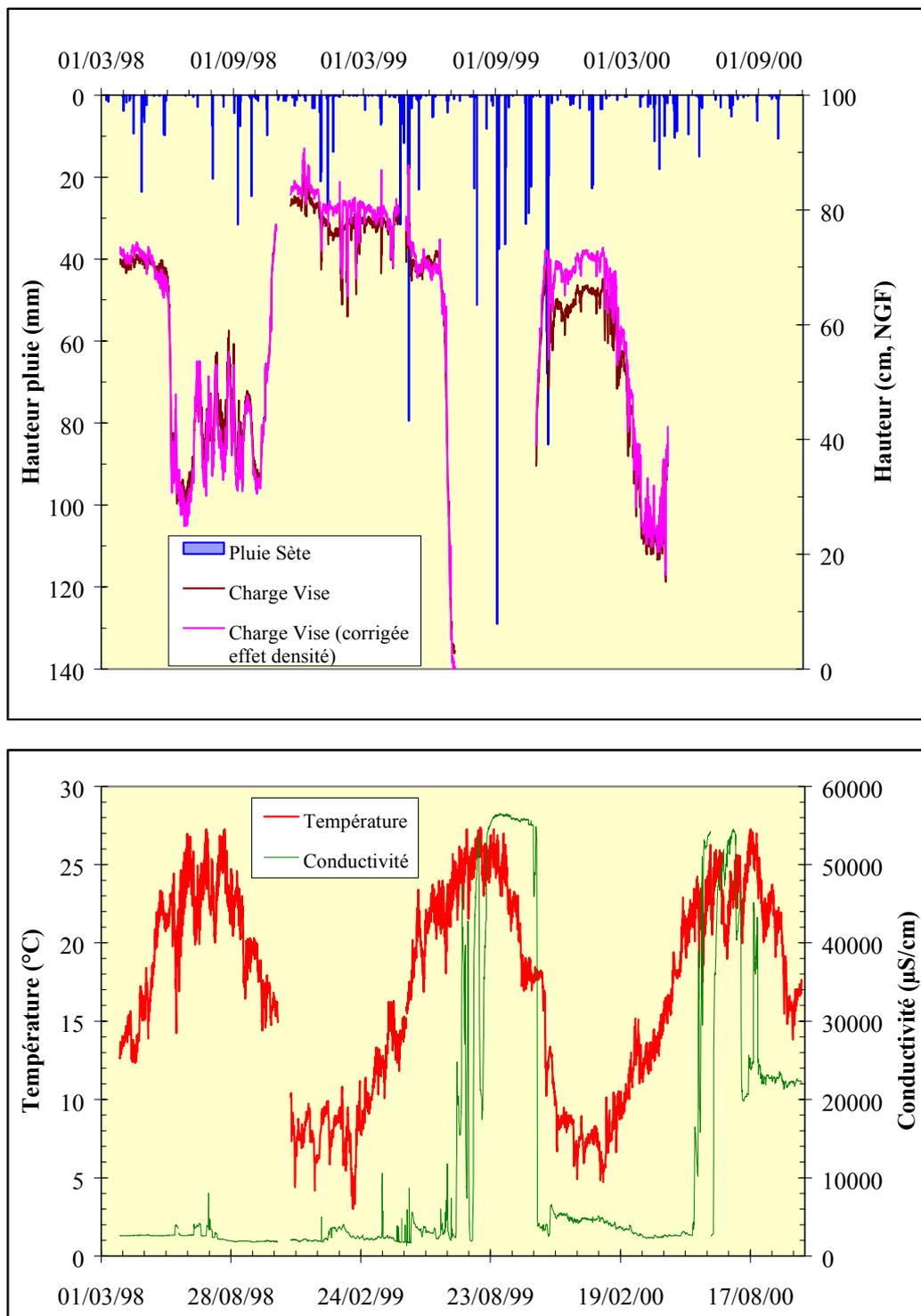


Fig. 9 - Évolutions temporelles de la charge de la Vise (exprimée par rapport au niveau de l'étang), de la température et de la conductivité en fonction de la pluviométrie à Sète.

Il apparaît que **l'impact de la Vise sur l'étang reste très localisé en contexte de basses eaux**. Les données de cette expérimentation montrent que les panaches d'eau chaude et moins salée causés par le débit de la source sont localisés au droit du prolongement du gouffre de la Vise. L'eau douce de la Vise arrivant au fond de l'étang monte par ascension dans la partie centrale et y redescend ; une partie de l'eau peut être amenée à longer les parois du gouffre. Le schéma conceptuel suivant peut être établi (fig. 10) :

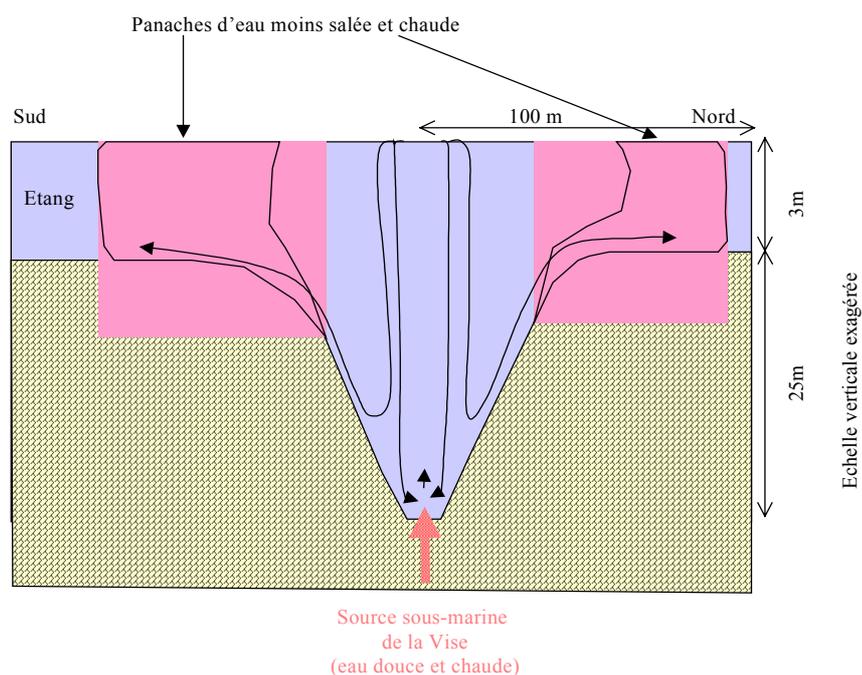


Fig. 10 - Schéma conceptuel de la source de la Vise.

La confrontation des résultats géochimiques avec ceux obtenus à partir de l'analyse de l'ensemble des profils de mesures réalisées au niveau des différents points du maillage permet de mieux contraindre le schéma conceptuel de fonctionnement de la zone étudiée. Cette étude permet de mettre en évidence que 3 masses d'eau de qualités différentes s'individualisent tout autour du gouffre de la Vise (fig. 11).

On montre que la première masse d'eau est froide et fortement minéralisée et présente une faible extension spatiale. La seconde masse d'eau qui est nettement plus chaude et moins minéralisée que la précédente semble, s'organiser spatialement suivant un anneau centré sur le point 34 (projection à la surface du point le plus profond du gouffre de la Vise). Il apparaît que cet anneau, dont la largeur avoisine les 25 m, se situe en fait au droit du prolongement du cône du gouffre, dans les zones où on observe une rupture de pente. On montre que cette masse d'eau résulte d'un mélange avec l'eau de la Vise. Enfin, la dernière masse d'eau qui est à la fois plus minéralisée et moins chaude que la précédente semble

s'organiser autour de l'anneau à une distance de 50 m au minimum du point 34. On montre que cette masse d'eau ne s'est pas mélangée avec l'eau de la Vise.

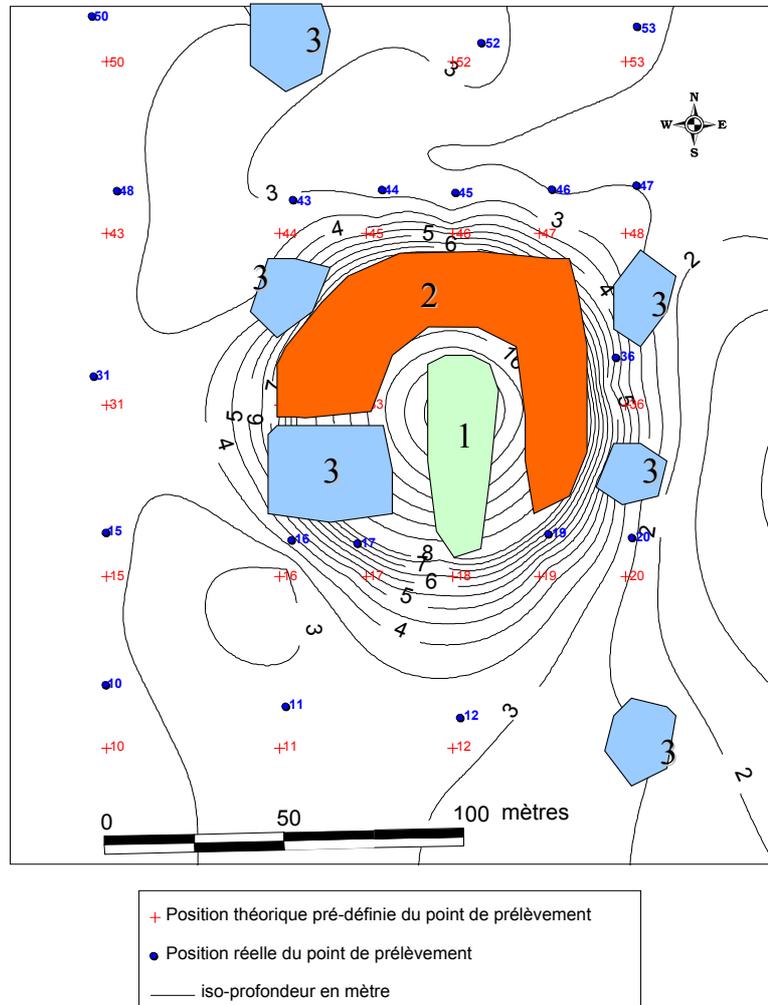


Fig. 11 - Localisation des différentes populations identifiées à partir des analyses chimiques autour du gouffre de la Vise (étang de Thau).

b.2. Résultats de la modélisation

La modélisation du flux thermique de la source de la Vise dans le but de déterminer le débit de la source ainsi que la répartition spatiale de la température autour de la source, a été effectuée en partenariat avec l'association GRADIENT, Groupe d'Hydraulique Numérique de Compiègne (annexe 3 du volume 2). Le couplage de deux modèles numériques à éléments finis a été développé par GRADIENT afin de simuler la distribution de la température et de déterminer ainsi le débit de la source pour les conditions expérimentales

de mars 1999. Le premier modèle est un modèle hydrodynamique vertical en 2D qui tient compte de la symétrie de révolution ; le deuxième est un modèle 2D axisymétrique basé sur l'équation de transport-diffusion.

Le champ de température en fonction du champ de vitesses peut ainsi être calculé pour des conditions aux limites données.

La gamme de débit comprise entre 50 et 1 000 l/s a été imposée comme étant une des conditions aux limites, l'autre étant notamment la température de la source de la Vise, soit de 20 °C.

À titre d'illustration, sont présentés les résultats des simulations pour des débits de 50 l/s, 100 l/s et 1 000 l/s (fig. 12 à 14).

Débit de la source $Q = 50$ l/s

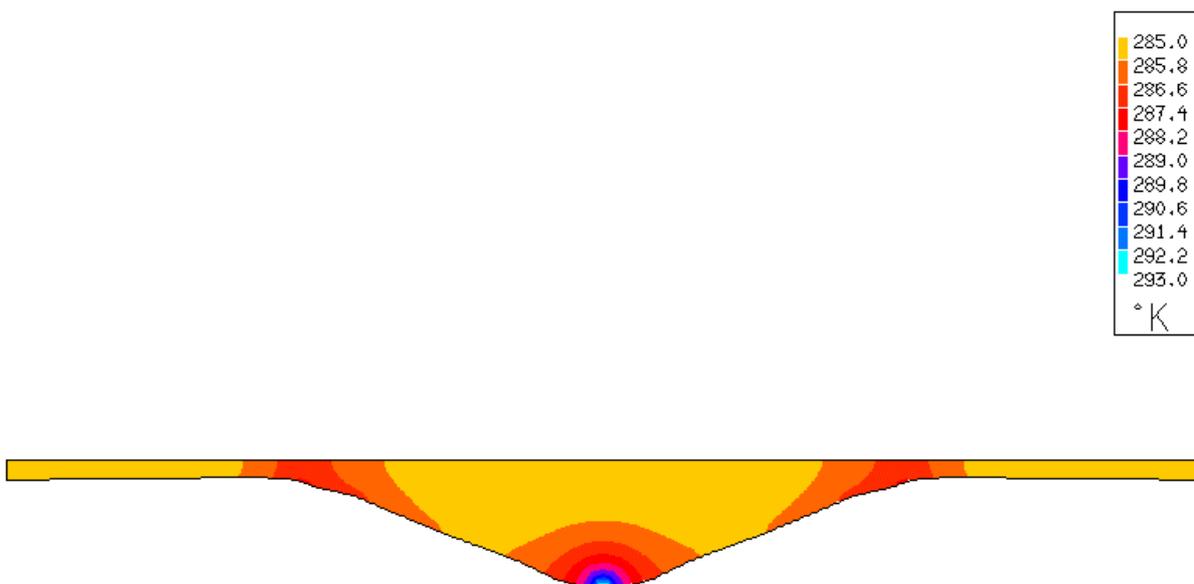


Fig. 12 - Champ des températures simulées pour un débit de 50 l/s.

Débit de la source Q = 100 l/s

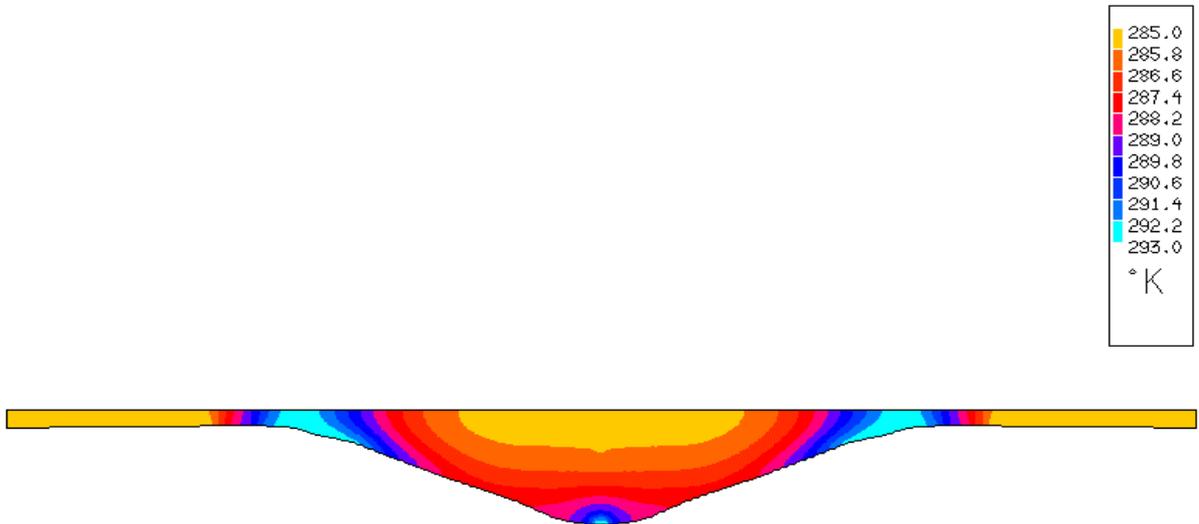


Fig. 13 - Champ des températures simulées pour un débit de 100 l/s.

Débit de la source Q = 1 000 l/s

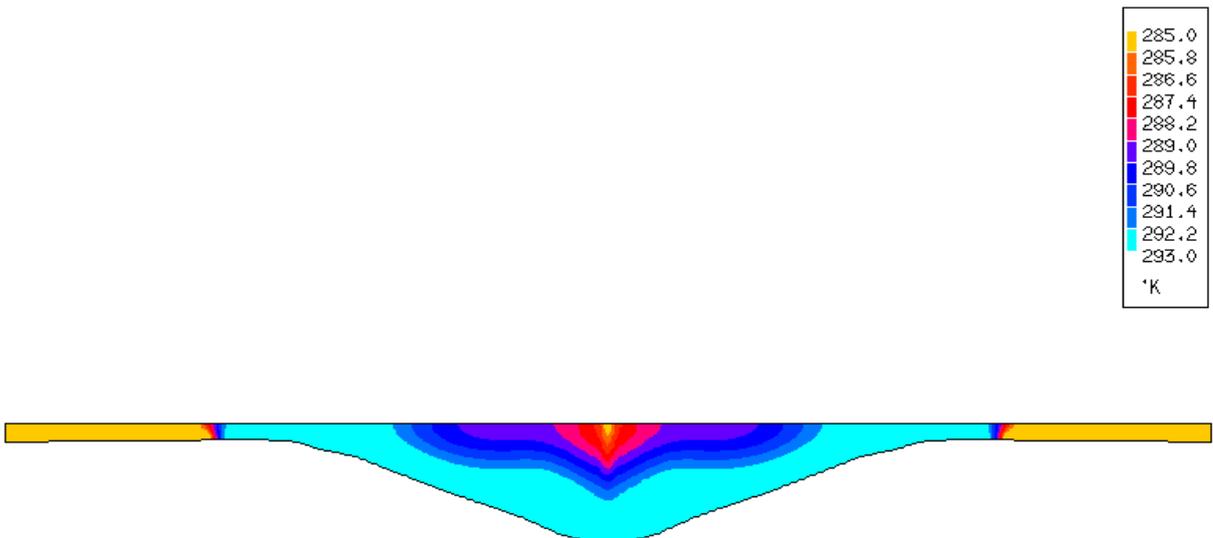


Fig. 14 - Champ des températures simulées pour un débit de 1 000 l/s.

À partir des différents cas simulés, on peut observer sur la répartition de la température, que cette dernière décroît rapidement dès la sortie du gouffre. Pour un débit de 50 l/s, la température passe rapidement de 20 à 12 °C sur quelques mètres seulement. La température de la source de la Vise atteint la surface libre à partir d'un débit de 100 l/s ; ces températures élevées ne sont pas observées au droit de la source mais selon une couronne. Plus le débit de la source augmente, plus la bande du panache chaud en surface est large. À partir de 400 l/s sa largeur se stabilise. À partir de cette valeur également, une couche d'eau chaude continue apparaît sur le fond et son épaisseur augmente progressivement avec le débit. À 1 000 l/s, elle occupe près de la moitié de la hauteur de la dépression de la source.

En considérant la température de la Vise comme étant à 20 °C, la comparaison des données expérimentales avec celles obtenues par modélisation, permet de déduire que, pour les conditions du moment de la mesure (mi-mars 1999), **le débit de la source de la Vise est plus proche de 50-100 l/s que de 1 000 l/s**. Pour un débit inférieur à 100 l/s, selon les résultats de la modélisation couplée, le champ de température est constitué d'une cellule au niveau de la partie inférieure du gouffre et d'une couronne de température, isolant une masse d'eau plus froide dans la partie centrale au droit de la source. Cette situation correspond à ce qui est observé de manière expérimentale, à l'exception de la continuité de la couronne. Les données expérimentales ne montrent pas une continuité ; ceci est dû très probablement à des courants résiduels de l'étang en surface, non pris en compte dans le modèle ou à une perturbation par le pompage au-dessus de la source, non prise en considération dans ces modélisations.

Dans les conditions des mesures réalisées en mars 1999, il apparaît donc que :

- l'essentiel du flux d'eau sortant de la Vise se propage verticalement et vers le haut au droit de la source. Les données de modélisation (champ de vitesse) sont en très bon accord avec le résultat du traitement des mesures hydrochimiques (localisation de la masse d'eau 1 au droit de l'émergence) ;
- lors de leur remontée vers la surface, les eaux se partagent en deux groupes :
 - les eaux les plus internes à cette zone d'écoulement vertical sont reprises dans un flux descendant et alimentent aussi, avec les premières, une cellule « convective » autour des abords immédiats de l'émergence ;
 - les eaux les plus externes replongent elles aussi, mais avec une pente plus faible et constituent une deuxième cellule dont les lignes de courant s'éloignent de l'émergence tout en montrant, elles aussi, une composante verticale descendante. Elles peuvent être associées à la masse d'eau 2.

Tous ces processus sont principalement gouvernés par les phénomènes densitaires associés aux variations de température.

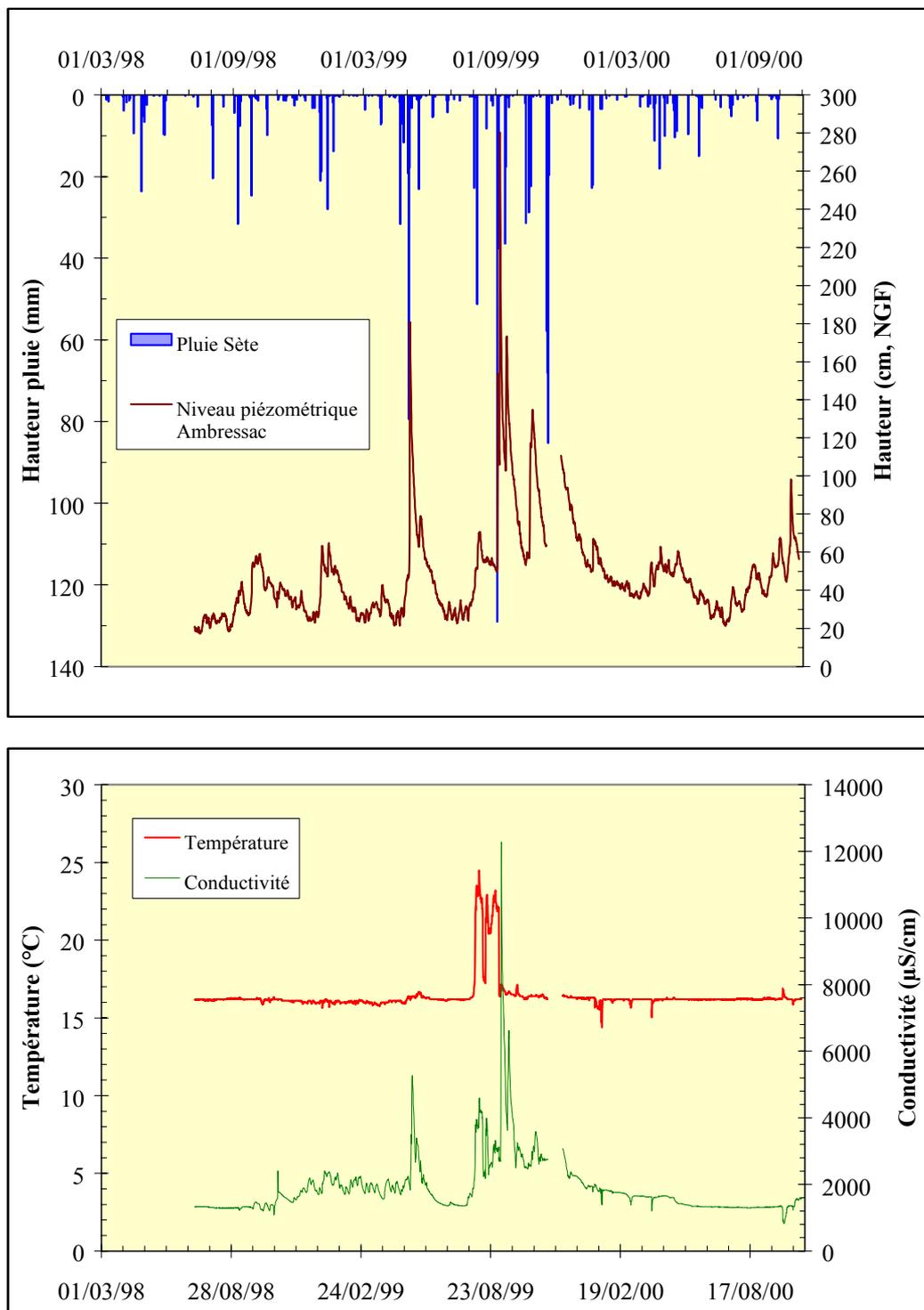


Fig. 15 - Évolutions temporelles du niveau piézométrique de la source d'Ambressac, de la température et de la conductivité de l'eau en fonction de la pluviométrie à Sète.

• **Source d'Ambressac (BRGM)**

La source d'Ambressac (ou d'Inversac) située sur le site de l'usine d'engrais Sud Fertilisants à Balaruc-les-Bains est aménagée et captée pour les besoins de l'usine. Il s'agit d'un puits, situé au pied de la falaise de calcarénite miocène et donnant accès à un conduit souterrain noyé, reconnu sur quelques centaines de mètres par des plongeurs.

La source a été équipée, le 8 juillet 1998, d'une station NIMBUS HYDROSENS qui permet l'acquisition au pas bi-horaire du niveau de l'eau, de la conductivité et de la température. Les évolutions temporelles du niveau piézométrique, de la température et de la conductivité de l'eau de la source d'Ambressac en fonction de la pluviométrie sont présentées à la figure 15.

Les mesures enregistrées sur le site d'Ambressac indiquent que la charge piézométrique évolue fortement en fonction du contexte hydrologique. L'amplitude de variation entre les périodes de basses et hautes eaux est donc supérieure à 2 m. Les pics de crue du niveau piézométrique semble apparaître 2 jours après les épisodes de pluie importants ($H > 20$ mm). La décrue du niveau piézométrique semble durer un mois environ.

La conductivité de l'eau d'Ambressac présentent également une importante variabilité temporelle. On observe généralement une augmentation de la conductivité de l'eau suite aux épisodes de pluie. La température de l'eau d'Ambressac en période d'étiage est voisine de 16 °C. En période de crue, on observe également une légère augmentation de la température. Au cours des crues des mois d'août et septembre 1999, la température a fortement augmenté pour atteindre des valeurs proches de 23 °C.

Compte tenu du contexte hydrogéologique de la presqu'île de Balaruc, les augmentations de conductivité et de température sont probablement à attribuer à la composante thermique du système.

• **Site du Mas Charmant (BSS 1016-1X-0214), Lecornec, (BSS 0990-5X-0051) et forage S19, à Gigean (photo n° 3, BSS 1016-2X-0019) (BRGM)**

Les évolutions temporelles des niveaux piézométriques journaliers des sites Mas Charmant, LeCornec et S19-Gigean sont présentées à la figure 16.

Les mesures enregistrées sur le site **Lecornec** indiquent que la charge piézométrique évolue fortement en fonction du contexte hydrologique. L'amplitude de variation entre les périodes de basses et hautes eaux est donc supérieure à 10 m. Les pics de crue du niveau piézométrique semble apparaître quelques jours (3-4 j) après les épisodes de pluie important ($H > 20$ mm). La décrue du niveau piézométrique semble durer un mois environ.

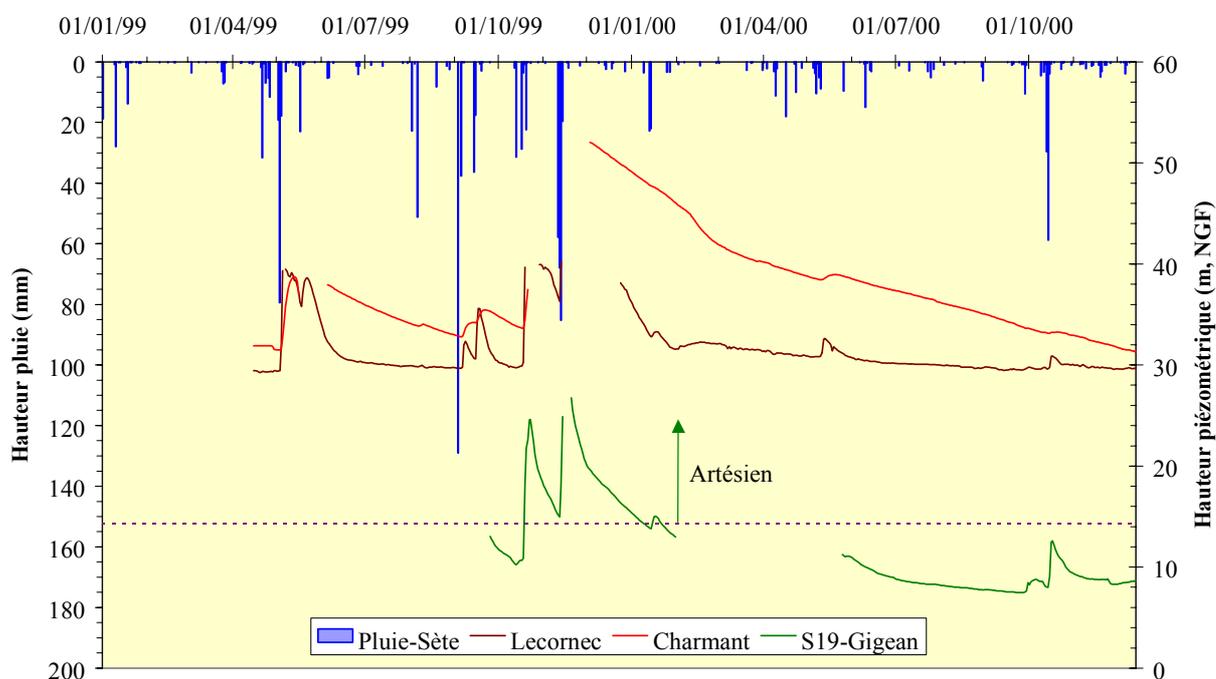


Fig. 16 - Évolutions temporelles des niveaux piézométriques journaliers des sites Mas Charmant, Lecornec et S19-Gigean en fonction de la pluviométrie à Sète.

Pour le site du **Mas Charmant**, les mesures indiquent que la charge piézométrique évolue également fortement en fonction du contexte hydrologique. En période de très hautes eaux (octobre-novembre 1999), la charge a augmenté de plus de 20 m, le niveau piézométrique a évolué de la côte + 33 m NGF à une cote supérieure à + 52 m NGF. Les pics de crue du niveau piézométrique semble apparaître une dizaine de jours après les épisodes de pluie importants ($H > 20$ mm), soit environ 3-4 jours après ceux mesurés au niveau du forage Lecornec. La décrue du niveau piézométrique semble durer plusieurs mois. Le système aquifère au niveau du Mas Charmant présente un comportement beaucoup plus inertiel que ceux des forages de Lecornec et S19-Gigean. Ce caractère inertiel du système peut être induit en partie par le fait que la mesure est influencée par les pompages au niveau de la mine et des pompages de l'ASA de Villeveyrac pour les besoins de l'irrigation. La décroissance linéaire du niveau d'eau traduit l'influence de pompages. Les enregistrements n'ont ainsi qu'une signification locale.

Pour le site du **Forage S19-Gigean**, bien que la chronique soit nettement plus courte que les précédentes, on montre que la charge piézométrique évolue également fortement en fonction du contexte hydrologique. Sur la période de mesure, le site est artésien du 19 octobre 1999 au 24 janvier 2000 (niveau d'eau supérieur à la cote

+ 14,3 m NGF = cote du sol). Les pics de crue du niveau piézométrique semble apparaître quelques jours (3-4 j) après les épisodes de pluie important ($H > 20$ mm). La décrue du niveau piézométrique semble durer plusieurs semaines. Le comportement de ce forage est à rapprocher de celui du forage Lecornec.

• **La source Cauvy (DIREN-LR)**

Cette source de débordement est captée pour les besoins en Alimentation en Eau Potable des communes de Balaruc-le-Vieux, Balaruc-les-Bains et Frontignan. La Compagnie Générale des Eaux exploite cette source avec un débit de pompage de $100 \text{ m}^3/\text{h}$, 24 h sur 24 h, sauf les mois d'hiver - 20 h sur 24 h. Le pompage entraîne un rabattement d'environ 50 cm sur l'aquifère. Il faut noter que le débit d'exhaure représente la somme d'une sollicitation directe de l'aquifère par pompage et du débordement naturel de la source. Le volume annuel pompé sur la source Cauvy est légèrement inférieur au million de m^3 ($929\,000 \text{ m}^3$ pour 1999).

La figure 17 montre l'évolution conjointe du niveau piézométrique et de la conductivité. Cette dernière oscille entre 950 à $1\,350 \mu\text{S}/\text{cm}$. L'eau est plus minéralisée pendant les périodes d'étiage de la nappe, il existe globalement une corrélation négative entre la conductivité et les niveaux piézométriques. L'aquifère montre un temps de réponse rapide aux sollicitations externes, le retour à l'état initial après pompage est immédiat. L'influence des précipitations se fait ressentir sur les niveaux, par contre les valeurs de conductivité semblent peu influencées par les pluies, hormis pour les épisodes les plus importants.

• **Le forage n° 362 - P4 (DIREN_LR)**

Ce point d'eau se situe sur la commune de Balaruc-les-Bains à l'extrémité nord-est de la presqu'île. La figure 18 présente l'évolution du niveau piézométrique couplée à la conductivité. Les variations de la charge hydraulique sont fortement corrélées aux précipitations. La conductivité varie entre 690 et $740 \mu\text{S}/\text{cm}$. Les tendances générales de variation de la conductivité semblent suivre celles de la variation de piézométrie.

• **Le forage n° 379 – Algudo (DIREN_LR)**

Ce forage se situe sur la commune de Poussan au nord-ouest de la presqu'île de Balaruc. La figure 19 présente l'évolution du niveau piézométrique couplée à la conductivité qui varie entre 790 et $950 \mu\text{S}/\text{cm}$. Les variations de la charge hydraulique sont fortement corrélées aux précipitations. Les variations de la conductivité ne sont pas à mettre en relation avec les variations des niveaux piézométriques.

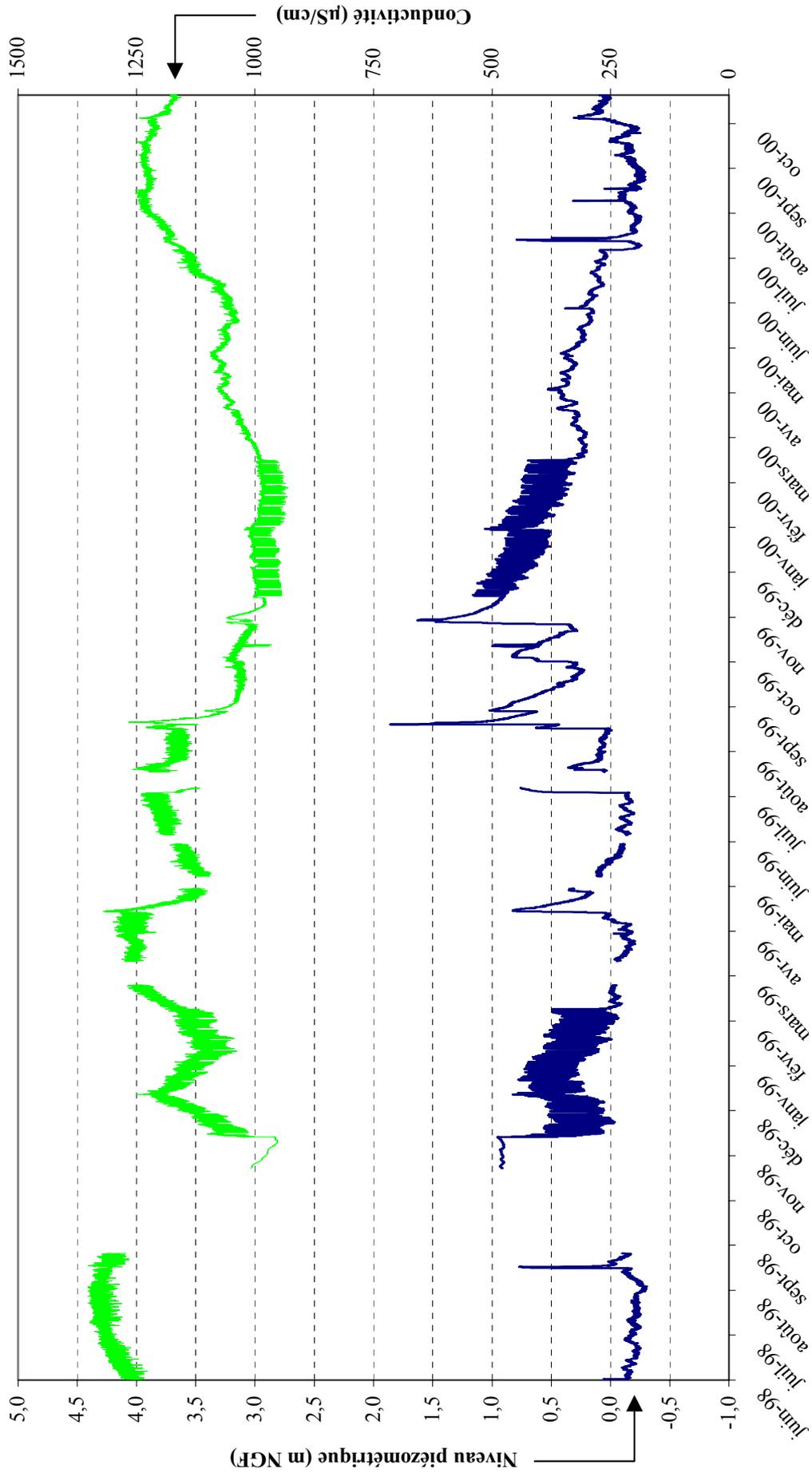


Fig. 17 - Niveau piézométrique et conductivité – source de Cauvy.

- **Le forage n° 3217 - Tennis (DIREN_LR)**

Ce forage se situe sur la commune de Balaruc-le-Vieux au nord de la presqu'île. La figure 20 présente l'évolution du niveau piézométrique couplée à la conductivité qui varie 630 et 670 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les niveaux varient de 2 m pendant l'étiage à 7,5 m pendant la recharge automnale de novembre 1999. Les variations de la charge hydraulique sont corrélées aux précipitations. Aucune tendance ou corrélation n'apparaît entre les variations des valeurs de conductivité et les autres paramètres enregistrés.

- **Le forage n° 3266 - Good Year**

Ce point d'eau se situe sur la commune de Mireval sur la partie médiane de la montagne de la Gardiole à plusieurs kilomètres de la presqu'île de Balaruc. Il a été retenu considéré comme représentatif des écoulements en provenance du massif de la Gardiole. La figure 21 présente l'évolution du niveau piézométrique couplée à la conductivité qui varie entre 933 et 940 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les variations du niveau piézométrique semblent corrélées aux précipitations.

Tous ces forages réagissent tous aux fortes précipitations de mi-novembre 1999 avec des amplitudes de variation différente selon leur éloignement du niveau de base et leur environnement physique immédiat représentant les différences locales de perméabilité.

4.2.2. Fonctionnement du réservoir thermal

- **Les forages de reconnaissance thermaux F3 et F4 (DIREN-LR)**

Les figures 22 et 23 montrent l'évolution des niveaux piézométriques corrélée à la conductivité. La piézométrie évolue entre 0,7 m et 2,5 m pour le forage F3 et entre 0,54 m et 2,5 m pour le forage F4. L'aquifère réagit, tout au moins localement, aux fortes pluies de septembre et novembre 1999.

La figure 23 montre l'évolution des niveaux piézométriques et de la conductivité sur le forage F4, cette dernière oscille entre 2 850 et 4 030 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Son évolution ne semble pas liée aux autres variations des paramètres enregistrés.

La comparaison des évolutions temporelles des paramètres enregistrés aux forages F3 et F4 permet de conclure à une nette connexion hydraulique entre ces deux forages

4.2.3. Interrelations hydrauliques entre les différents réservoirs

L'interdépendance des différents réservoirs souterrains a été analysé à partir des résultats des traitements du signal effectués sur les différentes chroniques (piézométrie, pluie, conductivité et température). Ce traitement du signal permet mettre en évidence les différentes composantes caractérisées par une chronique, qui contribuent à transformer un signal d'entrée en un signal de sortie.

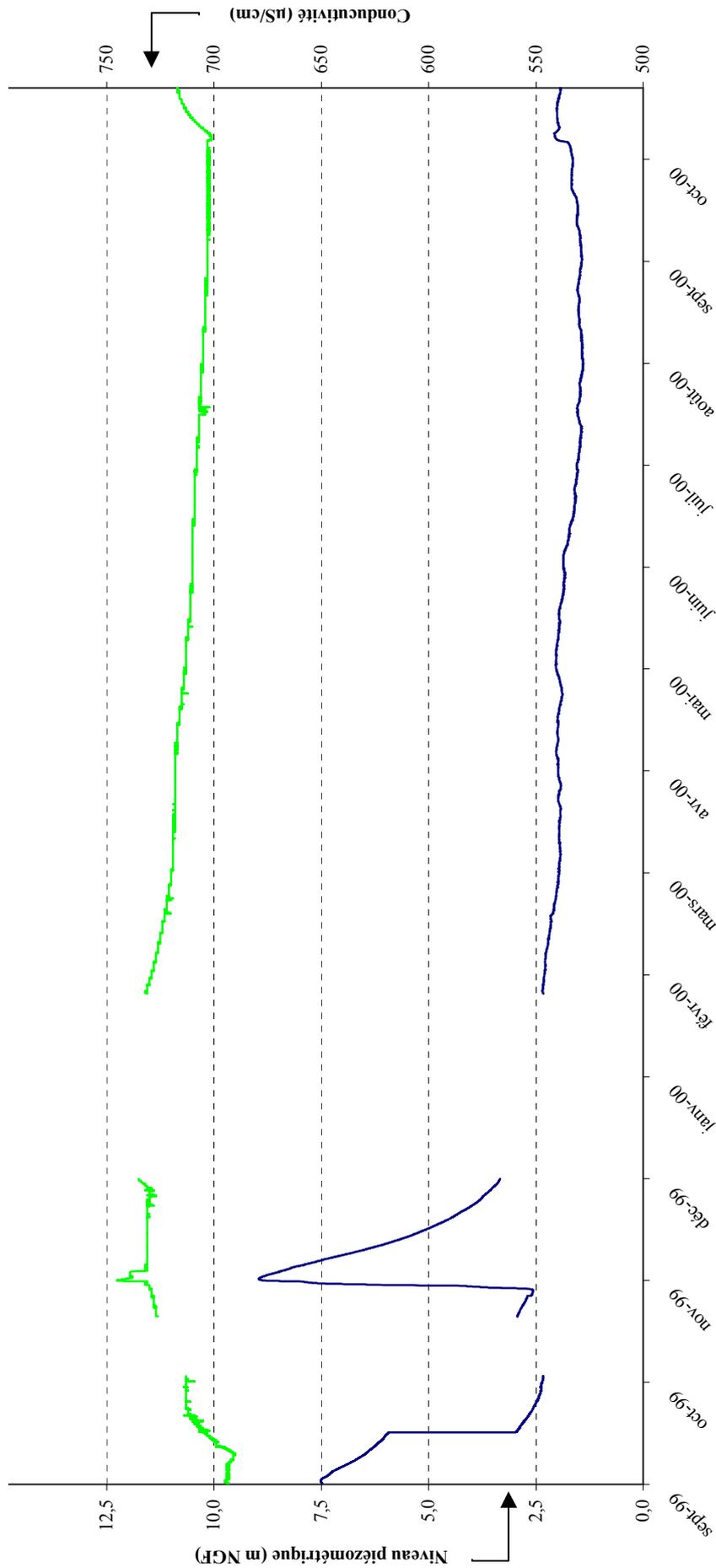


Fig. 18 - Niveau piézométrique et conductivité – Forage P4.

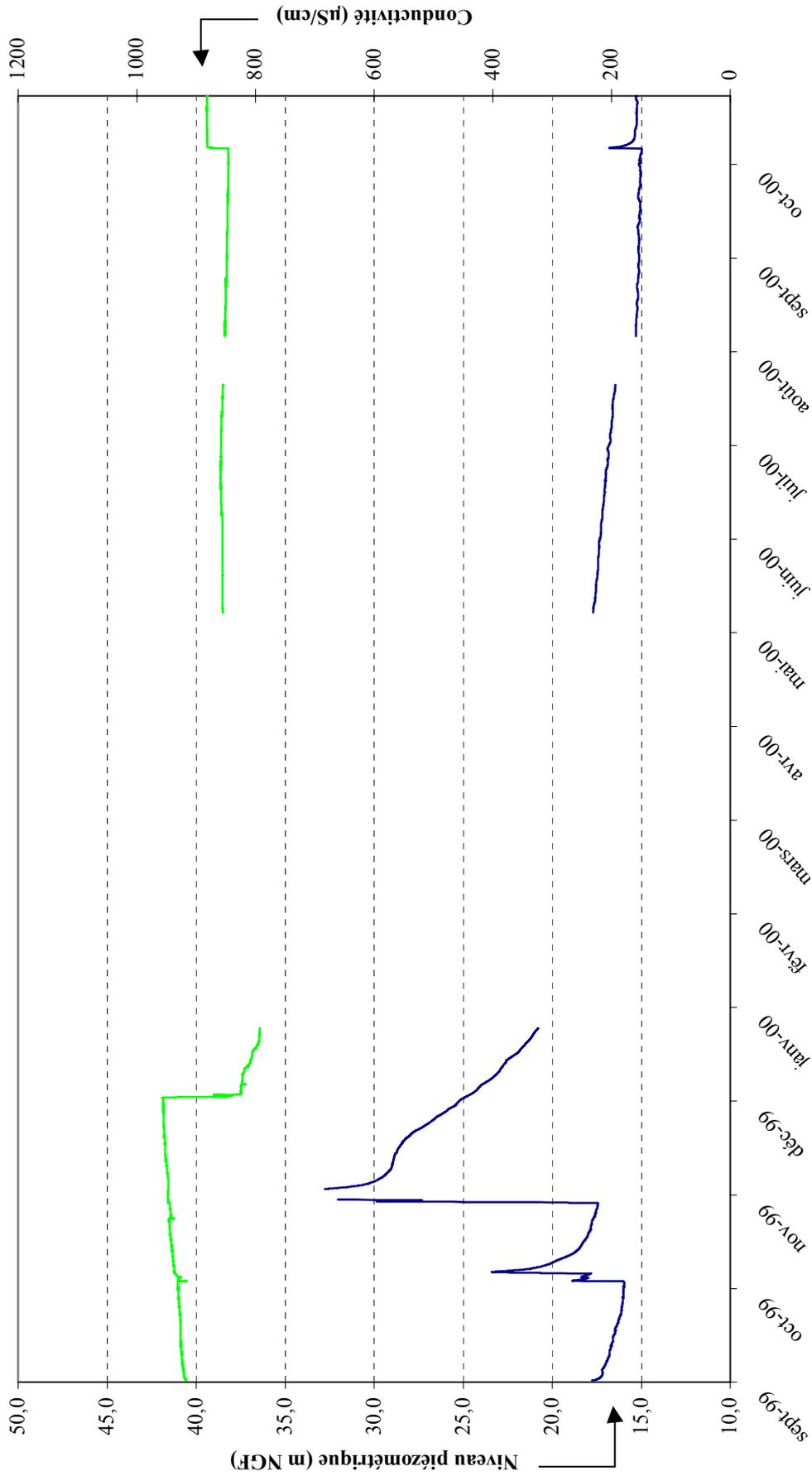


Fig. 19 - Niveau piézométrique et conductivité – Forage Alguido.

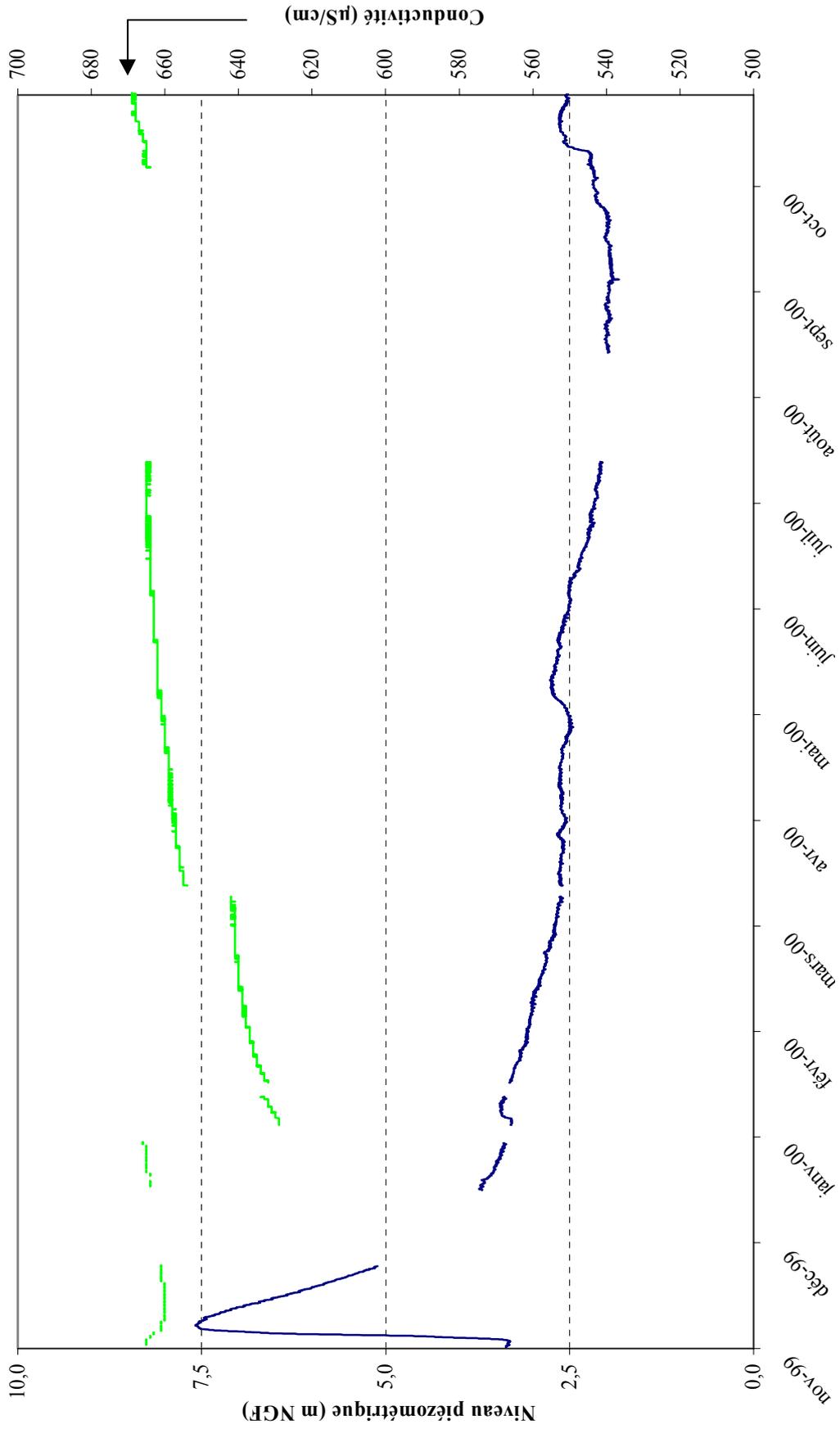


Fig. 20 - Niveau piézométrique et conductivité – Forage Tennis.

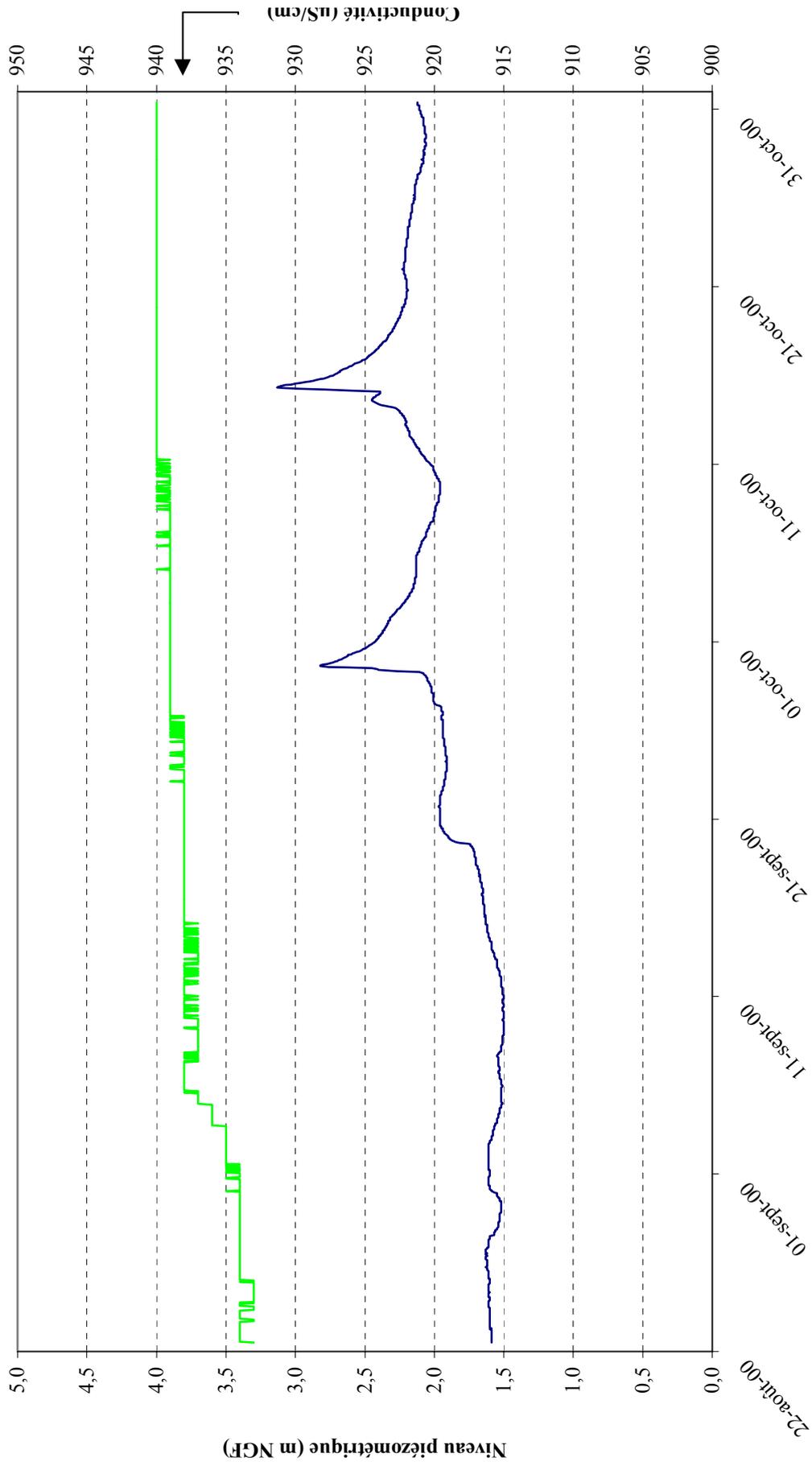


Fig. 21 - Niveau piézométrique et conductivité – Forage Good Year.

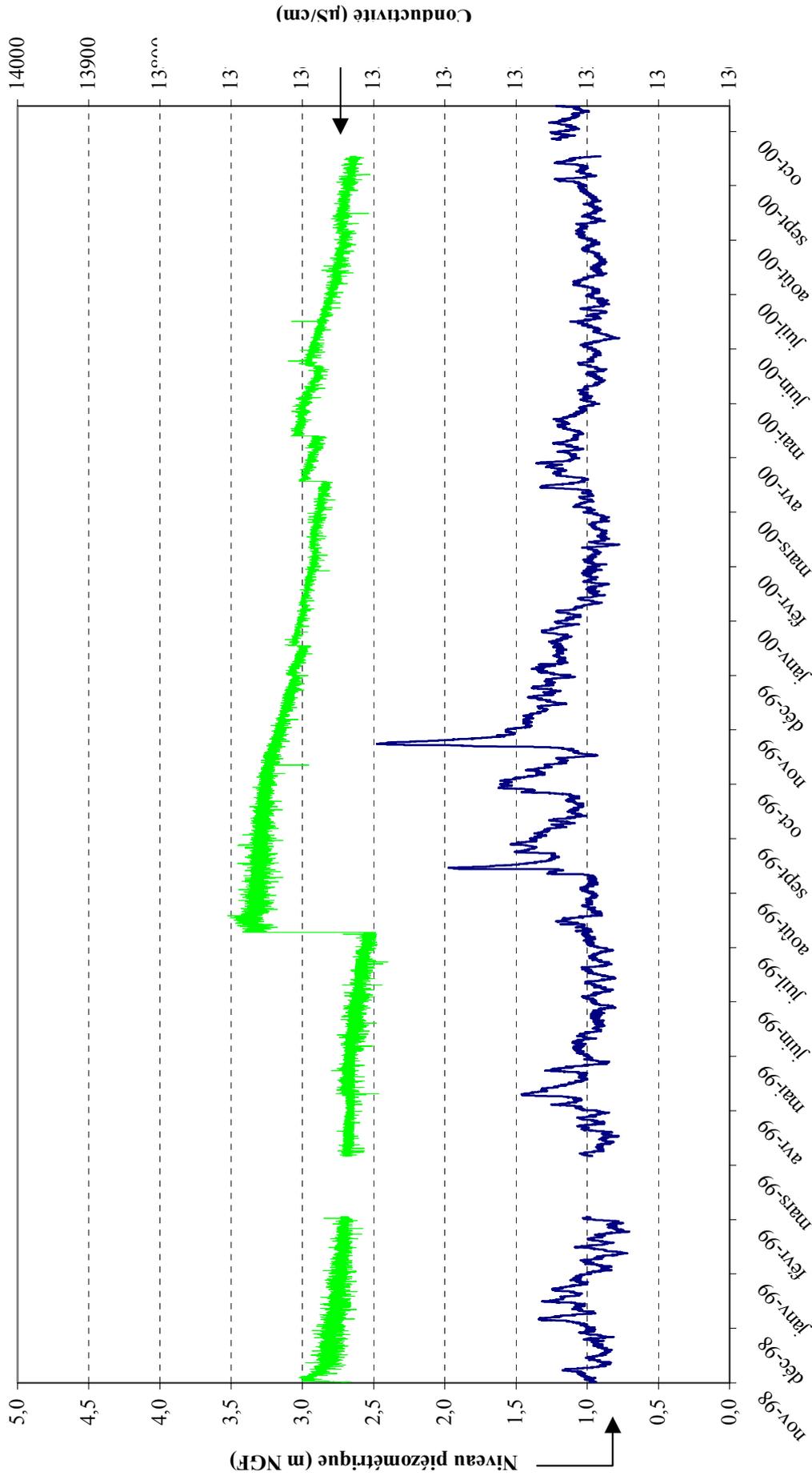


Fig. 22 - Évolution de la piézométrie et de la conductivité du forage F3.

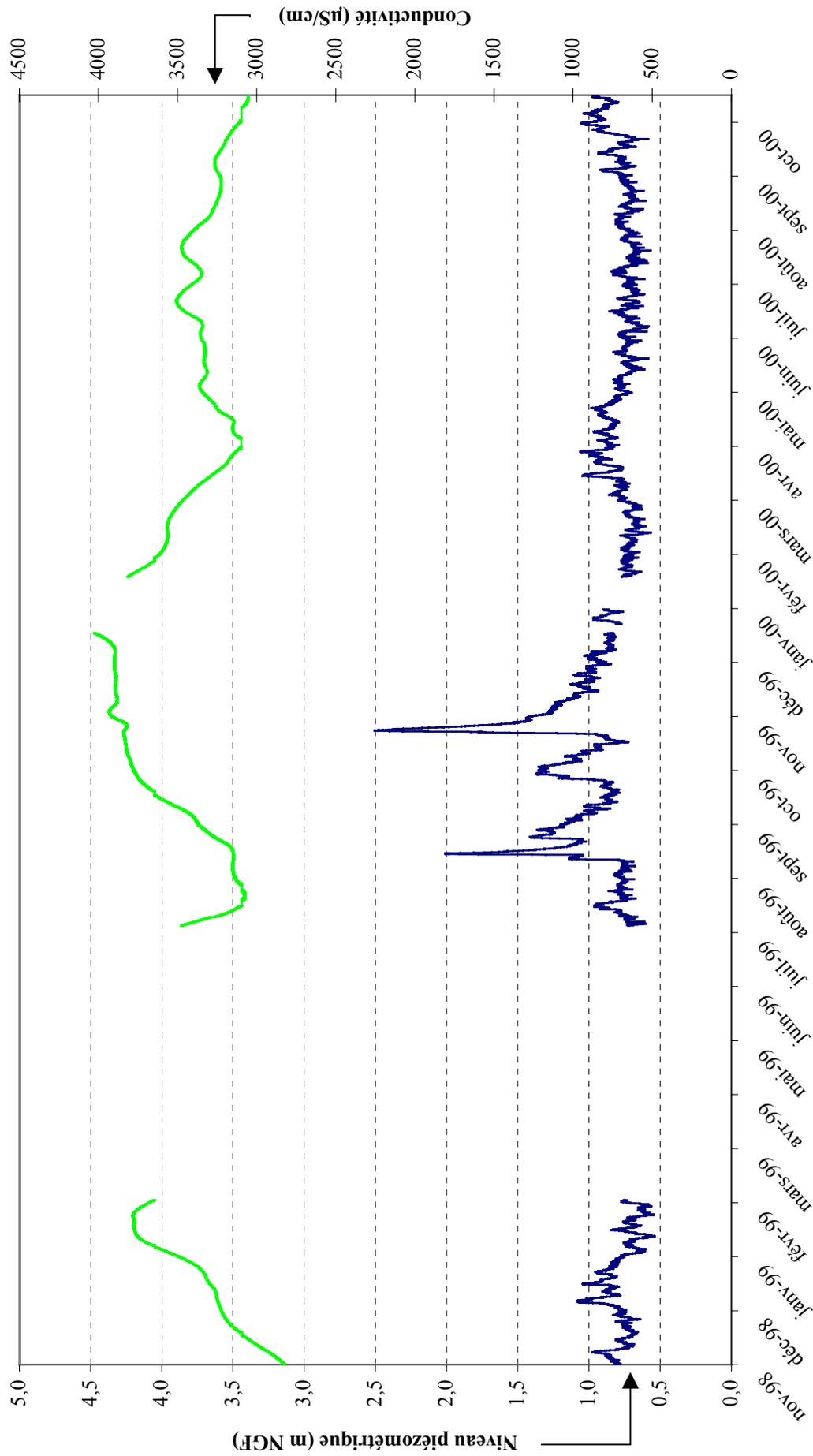


Fig. 23 - Évolution de la piézométrie et de la conductivité du forage F4.

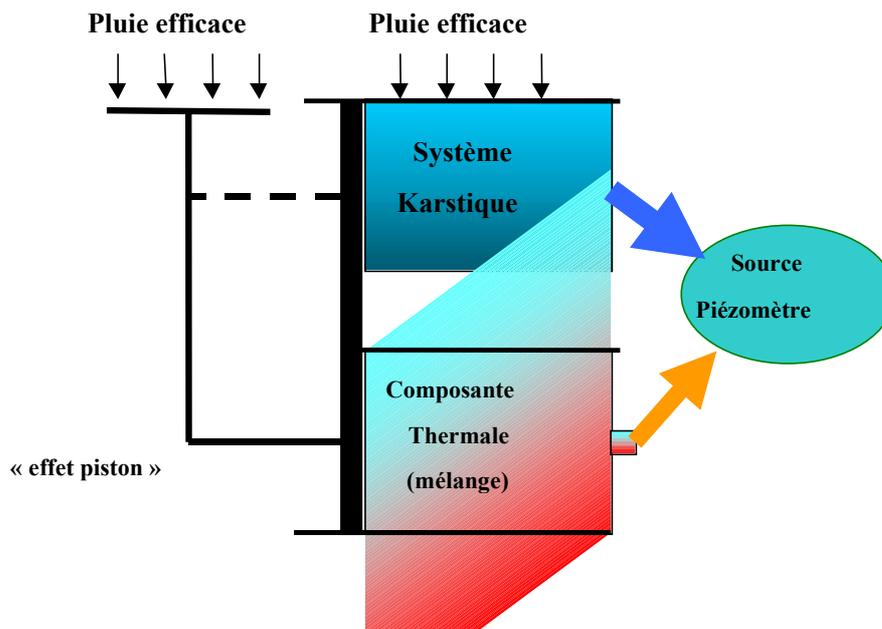
En résumé, il est possible de montrer que les variations du niveau de l'étang n'influent pas de manière significative sur les variations piézométriques des sources de la Vise, d'Ambressac, de Cauvy et des forages F3, F4, Tennis et P4. Les variations de la charge hydraulique de la Vise ne sont pas reliées de manière perceptible à la pluie efficace. Les précipitations influencent les autres points d'eau de manière significative. Au niveau des forages thermaux ainsi que des sources de Cauvy et d'Ambressac, il est possible en plus de mettre en évidence l'influence d'une composante inertielle lente plus ou moins importante (au-delà de 200 jours).

L'analyse des réponses de la conductivité et des températures a permis d'apporter des informations supplémentaires en terme de fonctionnement et de contribution des différents réservoirs (eau douce souterraine et eau thermique). Une contribution du réservoir thermal aux signaux de sortie des différentes sources, forages thermaux et autres forages situés sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains a été mise en évidence ; les proportions sont différentes selon les points.

Ainsi pour la source d'Ambressac, il a été montré que l'essentiel des variations piézométriques observées sont dues à la recharge ; l'influence de l'étang est faible. L'analyse de la réponse impulsionnelle des flux de conductivité d'Ambressac indique qu'une composante fortement minéralisée intervient dans les 20 premiers jours suivants un événement de pluie efficace, alors que la composante karstique a un temps de régulation nettement plus long (supérieur à 200 jours). L'ensemble de ces résultats concernant la source d'Ambressac conduit à conceptualiser le fonctionnement de cette source à partir de la vidange de deux réservoirs : l'un fortement minéralisé caractérisé par un temps de transfert court suggérant un effet piston et l'autre fortement différé dans le temps, résultant des processus d'infiltration dans l'aquifère karstique (fig. 24). De même, il a été montré pour la source de Cauvy, que l'essentiel des variations piézométriques est dû à la recharge. L'analyse de la réponse impulsionnelle du flux thermique a conduit comme précédemment à identifier la contribution de deux réservoirs ; l'écoulement karstique se produit 70 jours après l'événement de pluie efficace, alors que l'influence du réservoir ne se fait plus ressentir. L'interprétation des données des forages thermaux (F3 et F4) a permis de déterminer des fonctions de transfert de durée plus courte que pour les deux sources mentionnées ci-dessus ; la contribution de l'eau karstique de surface ne semble pas influencer de manière prépondérante le système thermal capté par ces ouvrages. Si l'analyse de la réponse impulsionnelle de la charge de la Vise semble indiquer qu'il n'y a pas de relation directe entre la pluie efficace et les variations de charge partielle, l'interprétation de la réponse impulsionnelle du flux de conductivité semble indiquer une relation entre variation de conductivité et pluie efficace. Des similitudes avec les sources de Cauvy et d'Ambressac en terme de conceptualisation du fonctionnement et des réservoirs qui contribuent existent. La contribution du réservoir thermal à l'écoulement de la Vise est comparativement plus important que pour les sources d'Ambressac et de Cauvy (fig. 25).

On montre également que l'influence des eaux thermales en période de crue peut se faire sentir à des degrés divers à l'ensemble de la presqu'île de Balaruc.

En période de Crue



En période de basses eaux

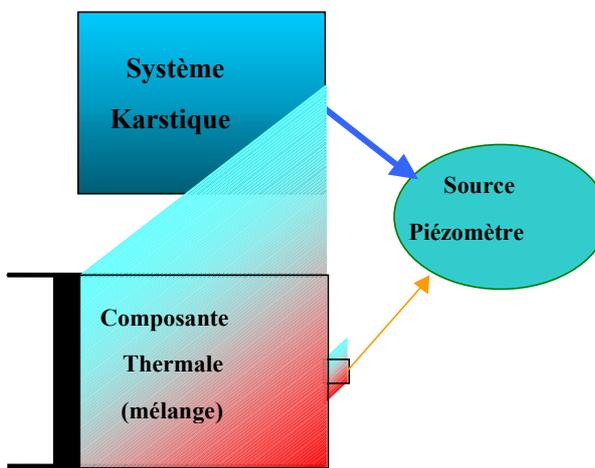


Fig. 24 - Conceptualisation du fonctionnement hydrologique des sources karstiques de la presque île de Balaruc.

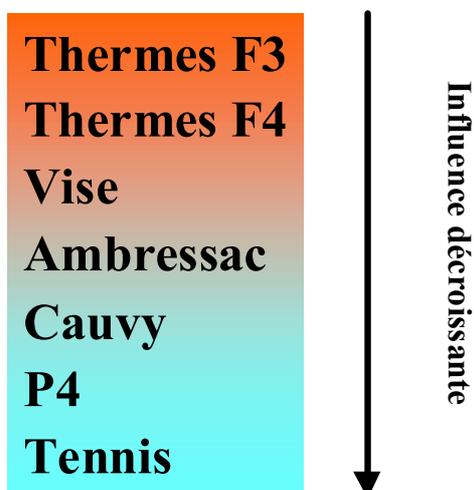


Fig. 25 - Hiérarchisation qualitative de l'influence des eaux thermales sur le secteur de la presqu'île de Balaruc.

4.3. CARACTÉRISTIQUES ET ORIGINES DES EAUX SOUTERRAINES

4.3.1. Hydrochimie et analyses isotopiques comme outils de caractérisation des réservoirs

Les données hydrochimiques et isotopiques des eaux souterraines et de surface sont des données dont l'analyse permet d'apporter des éléments complémentaires à la caractérisation du fonctionnement hydrologique d'un hydrosystème. Elles permettent d'apporter des éléments quant à l'origine et à la circulation des eaux.

Les isotopes stables de l'eau (^2H et ^{18}O) sont utiles pour déterminer l'origine de l'eau qui peut être météorique (ce qui correspond aux eaux « continentales » : eau de pluie, eau de surface et eau souterraine) ou marine. Ils permettent de mettre en évidence des phénomènes de mélange d'eau de qualité différente. Le carbone 13 permet de déterminer l'origine du carbone dissous dans l'eau (matière organique, carbonates...). Le strontium n'est pas modifié par des processus tels que l'évaporation ou la précipitation de minéraux. Sa composition isotopique reflète donc un terme source soit celui du strontium de l'eau initiale, soit celui d'un minéral qui s'est dissous.

4.3.2. Synthèse des résultats

Les résultats des analyses géochimiques de la campagne de prélèvement de 2000, réalisé dans un contexte de hautes eaux, confirment pour l'essentiel les interprétations que l'on a tirées à partir des analyses de 1996 dans un contexte de basses eaux.

Les eaux souterraines des massifs de la Gardiole, du causse d'Aumelas et des thermes se distinguent nettement les unes des autres. Les informations obtenues permettent en outre de préciser l'origine et l'histoire des eaux, d'évaluer le temps de résidence des eaux dans les différents systèmes et enfin de montrer que les différents systèmes hydrogéologiques interagissent entre eux dans le secteur de la Gardiole, et plus particulièrement au niveau de la presqu'île de Balaruc.

• Aquifères karstiques

Les analyses ont permis de montrer que les eaux karstiques de la Gardiole possèdent des signatures chimiques différentes de celles du Causse d'Aumelas.

(1) **Zone littorale de la Montagne de la Gardiole** : les eaux prélevées au niveau du littoral de la Gardiole présentent des concentrations élevées en éléments majeurs. Ces observations et les données isotopiques indiquent que la salinité relative des eaux de ce secteur (Robine de Vic, source d'Ambressac et dans une moindre mesure la source Cauvy) sont à attribuer à la composante hydrothermale et non pas à une intrusion d'eau de mer comme cela avait été suggéré précédemment.

(2) **Montagne de la Gardiole** : les concentrations en calcium et magnésium sont à attribuer à la dissolution des calcaires. Les teneurs élevées observées pour l'ensemble des éléments, sont liées à l'apport des pluies et aux apports anthropiques des zones urbanisées pour les nitrates.

(3) **Causse d'Aumelas** : la dissolution des dolomies accompagnée de la précipitation de la calcite entraîne des concentrations basses en calcium et élevées en magnésium dans les eaux du causse d'Aumelas et de l'ouest de ce massif. Dans ce massif, les eaux restent peu minéralisées, et globalement protégées des sources de pollutions anthropiques. En outre, on confirme bien que les eaux des forages profonds de Pézenas et de la Castillonne sont à rattacher au système hydrogéologique du causse d'Aumelas. L'étude permet également de confirmer que les eaux de la source d'Issanka sont à rattacher aux eaux du causse d'Aumelas. Ces différents résultats nous renseignent sur la direction d'écoulement des eaux dans la formation aquifère. L'eau s'écoule suivant une direction Nord-Sud dans la partie supérieure de l'aquifère, tandis qu'en profondeur, l'eau s'écoule de l'ENE vers l'WSW.

Les teneurs en tritium dans le causse d'Aumelas sont significatives d'eaux à temps de séjour court (quelques années). Les courts temps de séjour de ces eaux sont significatifs de la nature karstique de ces aquifères, dans lesquels les écoulements sont très rapides. Dans le forage de la Castillonne, malgré une profondeur de 800 m, le temps de séjour des eaux est également court de l'ordre d'une dizaine d'années. Les données de la Castillonne indiquent que les vitesses de circulation des eaux sont de l'ordre du kilomètre par an. Seules les eaux du forage de Pézenas ont résidé pendant une durée significativement plus longue (supérieure à 40 ans).

• Eaux thermales

Les eaux thermales du secteur de Balaruc sont chaudes (jusqu'à près de 50 °C) et salées (jusqu'à 5,7 g/l de chlorure). L'utilisation des géothermomètres (Si, K/Mg et Na/K) permet d'estimer la température des eaux du réservoir thermal située en profondeur. La température de l'eau du réservoir serait comprise entre 50 et 80 °C, ce qui compte tenu du gradient thermique, situerait le réservoir thermal à une profondeur comprise entre 1 200 m et 2 200 m.

La salinité des eaux thermales profondes, bien caractérisé à l'aide des prélèvements d'eau effectués dans le forage F8, s'explique comme le résultat d'un mélange entre d'une part, une eau douce d'origine karstique âgée de plus de 40 ans, et d'autre part, des eaux d'origine marine ancienne. L'âge précis des eaux de ces 2 pôles qui contribuent au mélange n'est pas connu. Les activités en ^{14}C indiquent que les eaux des forages F8 et F9 ont un temps de séjour très long, probablement proche de la limite du géochronomètre (40 000 ans). Les données de chlore 36 conduisent à suggérer que les fluides thermaux ont séjourné dans le réservoir profond quelques centaines d'années, voire quelques centaines de milliers d'années avant de remonter à la surface.

La proportion d'eau de mer dans les forages thermaux est maximale dans les forages F8 et F9 où elle représente respectivement 40 et 30 %. Les informations obtenues par les activités tritium et carbone 14, les teneurs en carbone 13, et les rapports isotopiques du strontium suggèrent que les eaux de ces forages présentent les caractéristiques les plus voisines du pôle thermal « pur ».

Au sein du réservoir profond, les eaux thermales qui avaient une signature marine à l'origine ont été fortement modifiées par une dissolution importante de carbonate. Elles se sont notamment significativement enrichies en calcium et en strontium. Cette dissolution importante de carbonate se marque nettement à l'aide de la signature isotopique en strontium et nous renseigne sur la formation géologique dans laquelle siège le réservoir thermal. Les données laissent suggérer que le réservoir thermal est situé dans les calcaires du Jurassique, à une profondeur comprise entre 1 200 et 2 200 m.

Les signatures des eaux des autres forages thermaux (F6, S12 et F5 pour 1996) s'expliquent comme le résultat d'un mélange entre les eaux thermales profondes et les eaux karstiques issues de la montagne de la Gardiole.

• Eaux de la Vise

La salinité des eaux de la Vise est principalement à attribuer à la composante thermique d'origine profonde de la presqu'île de Balaruc. On montre que la signature géochimique des eaux de la Vise peut être expliquée comme le résultat d'un mélange qui se produit entre les eaux thermales et les eaux du système karstique de la Gardiole, et que la contribution des eaux du causse d'Aumelas existe mais est de faible ampleur.

4.4. CONCLUSION DU MODE DE FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DU SYSTÈME DE THAU

Les résultats des interprétations des données hydrologiques et des paramètres physico-chimiques des suivis réguliers et en continu à l'échelle du pli ouest de Montpellier ainsi que des analyses chimiques et isotopiques en conditions de hautes et de basses eaux permettent de définir des modalités de fonctionnement des eaux souterraines au sein de la zone d'étude.

Le système karstique de Thau comprend la majeure partie du causse d'Aumelas, la montagne de la Moure et la partie sud-occidentale de la montagne de la Gardiole, ainsi que la presqu'île de Balaruc. Du point de vue du comportement hydrogéologique, les eaux circulent globalement selon un axe nord-sud en direction du niveau de base constitué par l'étang de Thau. Une continuité hydraulique est mise en évidence au niveau de la presqu'île de Balaruc et notamment au niveau des forages thermaux. L'ensemble des points d'eau suivis en continu au niveau de la presqu'île de Balaruc présente des caractéristiques influencées par trois composantes : les précipitations efficaces, le karst et un réservoir thermal. Les écoulements des eaux souterraines sont organisés conceptuellement selon deux systèmes, un système correspondant aux eaux karstiques et un système régional plus profond influencé par le réservoir thermal au profit des accidents de socle. Les sources matérialisent les zones d'exutoires des deux systèmes.

La signature hydrochimique des eaux permet de différencier les eaux circulant au niveau du causse d'Aumelas de celles circulant au niveau de la montagne de la Gardiole. L'accident situé au niveau du flanc occidental de la montagne de la Gardiole constituerait une limite entre deux sous-systèmes locaux, un au nord et l'autre au sud. La source de la Vise semble être un point de convergence des eaux souterraines dans la mesure où la signature géochimique de l'eau de la Vise s'explique comme le résultat du mélange des eaux issues de la Gardiole, du causse d'Aumelas et du réservoir profond thermal. La source de la Vise est ainsi le point de visualisation du débordement du système de Thau, y compris le secteur des thermes.

Vers le sud-ouest, les calcaires jurassiques s'enfoncent profondément sous l'étang puis sous la mer. Le schéma hydrogéologique que nous avons construit et qui semble le plus en accord avec les différentes données (même s'il comporte un certain nombre d'hypothèses), nous conduit à rechercher dans ce secteur la localisation du réservoir des eaux thermales.

Dans ce schéma (fig. 26 et 27), la mise en contact entre les eaux thermales et les écoulements karstiques se fait à la faveur d'une structure géologique qui permet la remontée des eaux thermales chaudes et salées. Cette structure semble suivre un dispositif particulier au niveau de la presqu'île.

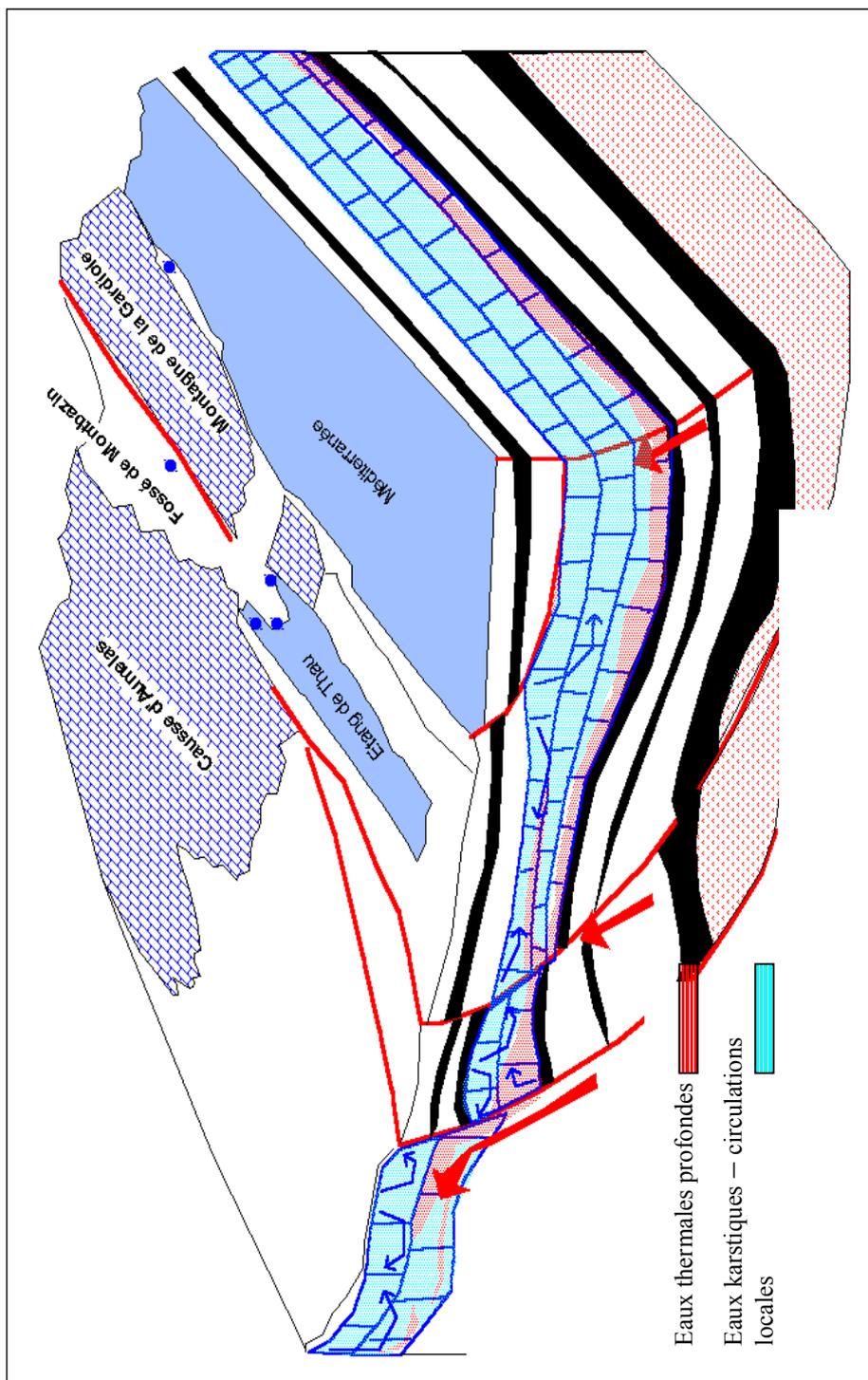


Fig. 26 - Schéma simplifié de la structure des formations calcaires où circulent les eaux souterraines.

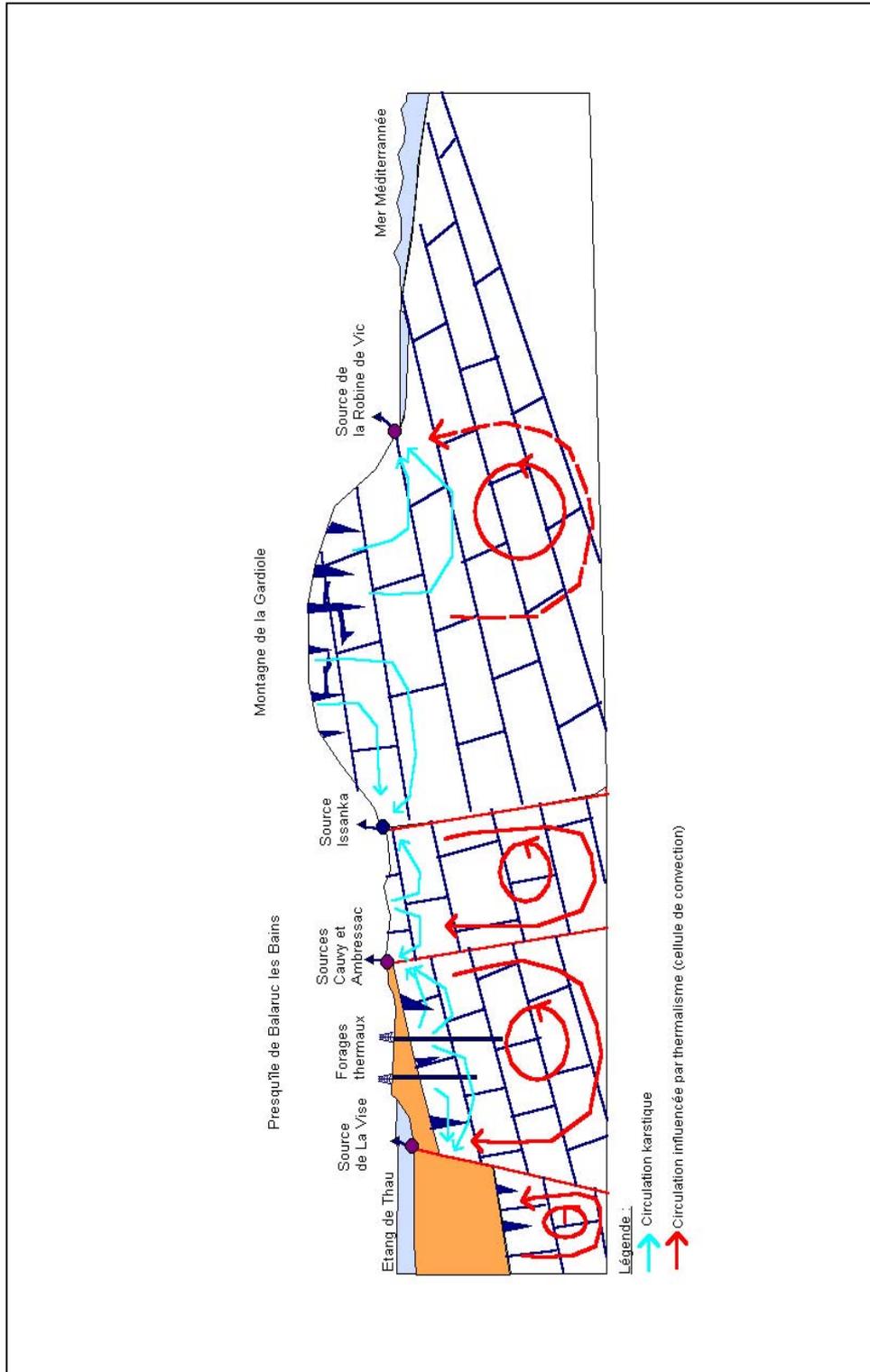


Fig. 27 - Coupe schématique de l'organisation des écoulements souterrains karstiques et thermaux au sein du système karstique de Thau.

5. Éléments d'explication de l'événement de 1993

5.1. SITUATION DE CAPTAGE DE LA SOURCE DE LA VISE

La source de la Vise située à une bathymétrie de - 30,40 m comprend une émergence principale au fond du gouffre et quelques petits griffons situés sur les parois ; c'est l'un de ces derniers qui a fait l'objet d'un micro-captage à l'aide d'un tube PVC de diamètre de 500 mm auquel est relié un tuyau de PET d'une longueur cumulée de 180 m (100 m et 80 m avec un raccord) fixé tout au long de la conduite d'eau servant à l'alimentation en eau de la pisciculture « Poissons du Soleil ».

Le griffon principal de la source a été coiffé d'une cloche afin d'optimiser le pompage d'eau de la source pour les besoins du GAEC « Poissons du Soleil » ; une augmentation de l'envasement au niveau du gouffre constatée par les pêcheurs de coquillages et nuisant à leur activité, la cloche a été ouverte en automne 1993. Cette modification de l'équilibre hydraulique aurait provoqué une perturbation de l'hydrosystème.

Suite à cet événement et jusqu'en 2000, la cloche n'existe plus. Au cours de l'année 2000, des modifications des installations de pompage du GAEC « Poissons du Soleil » ont été constatées par les plongeurs du Service Maritime (SMNLR) lors de plongées visant à détecter des pannes du système de mesures des paramètres physico-chimiques de la Vise. Si le gouffre principal n'est pas obstrué par une cloche comme avant 1993, une « caisse » grillagée faisant office de grosse crépine à l'extrémité des conduites reliées au système de pompage, repose au niveau du griffon principal sur les structures de l'ancienne cloche (photos 1 et 2 et fig. 28).

5.2. ORDRE DE GRANDEUR DU DÉBIT DE LA SOURCE DE LA VISE

Les résultats de la modélisation pour les données expérimentales de mars 1999 montrent que le débit de la source de la Vise est de l'ordre de 50 l/s à 100 l/s. Un facteur multiplicatif de 10 à 100 peut être envisagé pour des situations hydrologiques de hautes eaux, bien que nous ne disposions pas de données pour caler notre modèle en hautes eaux.

5.3. INFLUENCE HYDRAULIQUE SUR LA VISE

Des variations importantes de charge hydraulique sont observables au niveau de la source de la Vise de manière répétée. Afin d'analyser quelles pourraient être l'origine de ces variations, les observations faites lors d'un essai de pompage réalisé par le CERGA en 1985 sur le forage F5 dans le parc d'Issanka ont été reprises. Lors de cet essai à 230 m³/h pendant 88 h, les sources de la Vise, source Cauvy et source de la Vène ont été suivies. Les niveaux d'eau sur les forages thermaux ont été suivis par l'exploitant.

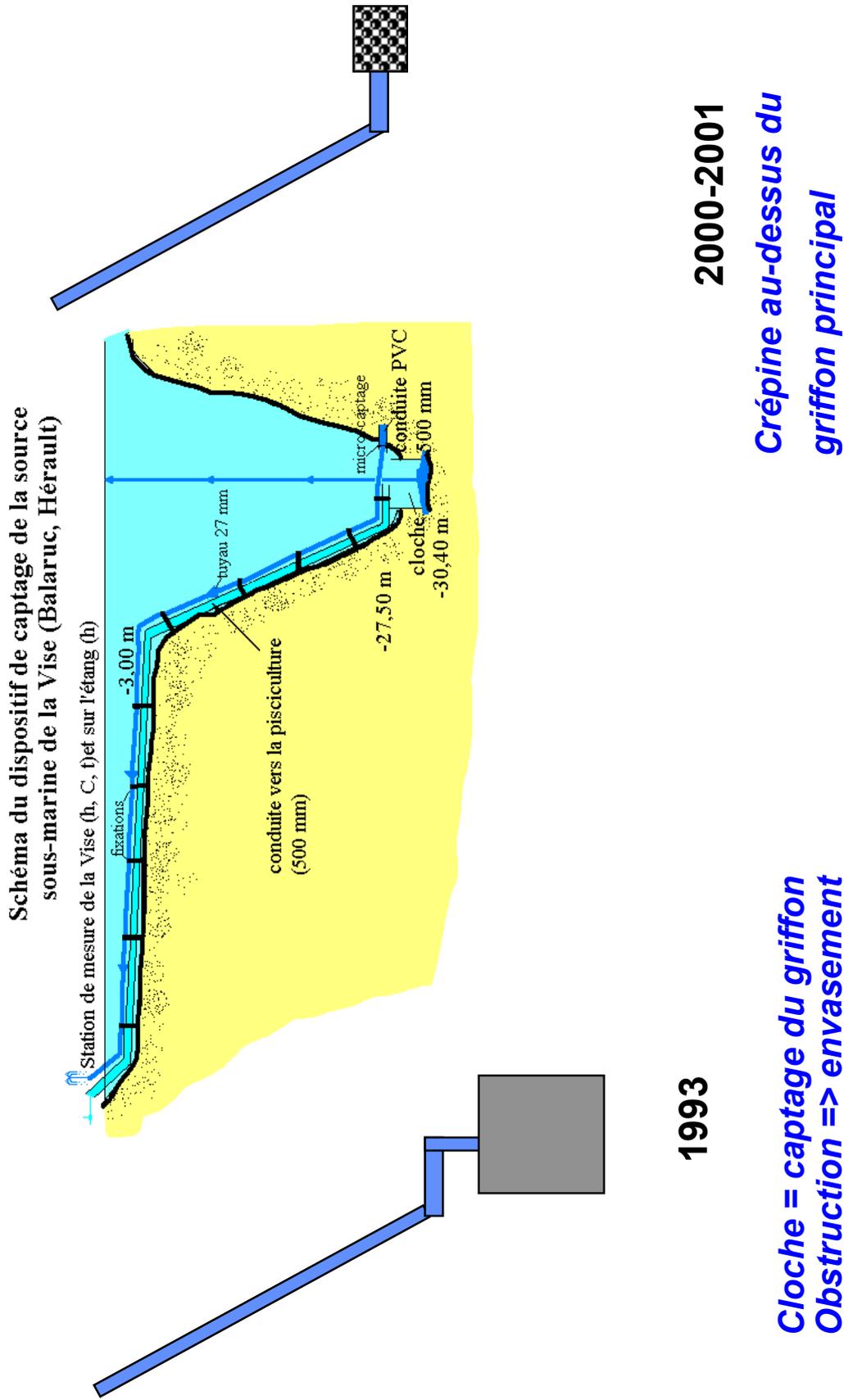


Fig. 28 - Évolution des installations de captage des eaux douces de la source sous-marine de la Vise.

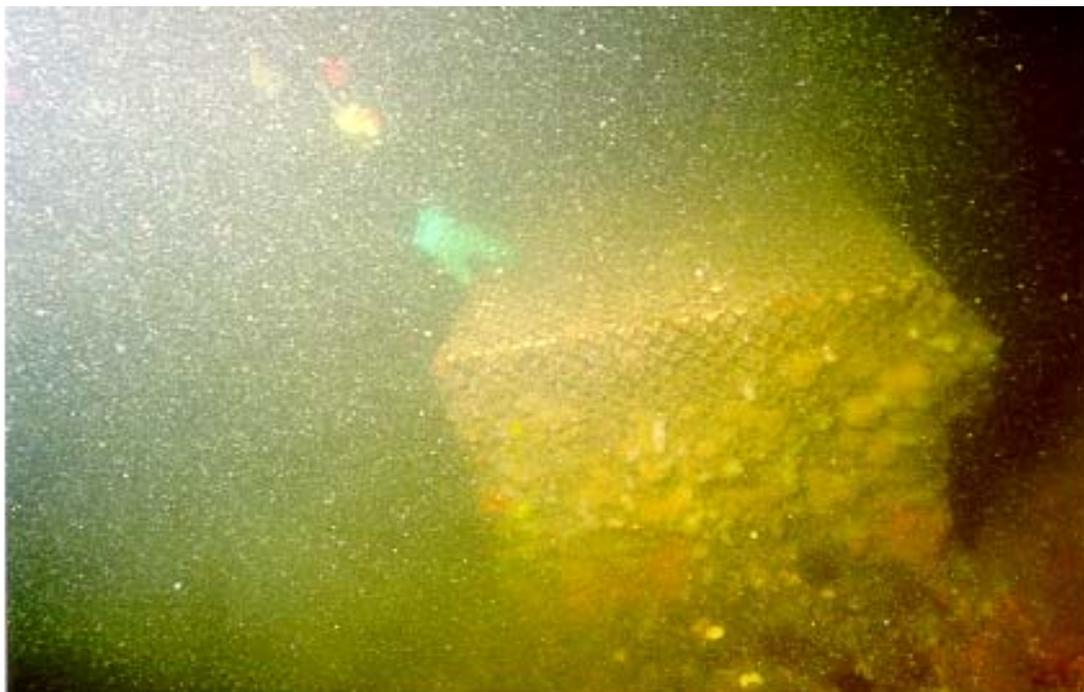


Photo 1 - Crépine parallélépipède au niveau du griffon principal de la source sous-marine de la Vise (photo SMNLR).



Photo 2 - Crépine reposant sur les anciennes bases de la cloche au niveau du griffon principal de la source sous-marine de la Vise (photo SMNLR).

Les principaux résultats sur la Vise montrent que les variations de niveau et de conductivité mesurées sur les bâches de reprise à proximité de la Vise n'ont pu être corrélées aux pompages à Issanka, bien que la représentativité des mesures étant mises en doute par les conditions de l'essai (rejets de l'eau de l'étang dans les bâches).

Une très légère remontée des niveaux et une baisse de conductivité au niveau de la source de Cauvy pouvaient laisser penser que les eaux refoulées en aval du parc d'Issanka auraient pu s'infiltrer en direction de Cauvy. Mais ces variations peuvent aussi être attribuées à l'exploitation sur la source d'Ambressac qui n'a pas été suivie pendant l'essai. Ainsi, le suivi de la source Cauvy n'a pas permis d'établir une relation entre Issanka et Cauvy.

Une baisse du niveau de 12 cm mesurée sur la source de la Vène pendant la période du pompage sur F5 a permis d'établir une relation hydraulique entre la Vène et Issanka. Le gradient hydraulique était alors de 0,4 ‰ ; une liaison Issanka – la Vise impliquerait un gradient plus élevé, environ 1,5 ‰.

À noter que pendant cet essai, aucune influence du pompage n'a été détectée sur les forages thermaux.

L'hypothèse formulée d'un important abaissement de la charge observé à la Vise pendant les périodes estivales, corrélé avec un abaissement général de la surface piézométrique observé sur plusieurs forages de la presque île pourrait être mis en relation avec la différence de charge entraînée par l'ouverture du barrage sur la Vène. Aucun enregistrement des ouvertures du barrage concomitant à l'enregistrement de la source de la Vise entre 1998 et 2000 n'étant disponible, cette hypothèse n'a pu être vérifiée.

5.4. CONDITIONS HYDROLOGIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES DE 1993

Pour la période 1990-2000, les cumuls mensuels de hauteurs de pluies sont reportés dans le tableau 1 ci-après.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	Moyenne mensuelle
janvier	4,8	27,4	45,2	0	10,5	16,1	205,5	135,9	8,8	65	55,2	52,2
février	33,4	64,2	42,1	59,2	151,5	10,2	150,8	5,8	23,8	0,8	2,6	49,5
mars	12,5	84,8	34,9	78,3	4,8	5,9	97,5	0,0	3,2	21,6	6,6	31,8
avril	80,6	75,7	14,2	116,7	28,7	42,6	43,1	12,2	53	59,8	49,6	52,4
mai	108,2	35,8	74,5	6	17,4	22,1	15,4	24	23,6	147	40,4	46,8
juin	6,2	15,8	135,3	16,3	20,4	4,9	32,5	97,4	0,2	18,0	22,2	33,6
juillet	12,5	10,4	44,5	2,8	16,3	7,5	25,8	4,2	3,2	3,2	15,2	13,2
août	32,1	11,6	2,4	14,4	36,8	14,7	59,9	42,8	30,8	86,8	9,6	31,1
septembre	49,8	30,4	43,2	97,4	157,7	29,6	64,6	21,4	72,2	225	15,2	73,3
octobre	133,7	63,9	207,3	152	133,3	98,8	73,6	56	16,4	89,8	106,2	102,8
novembre	51,1	10,6	5,3	178,2	50,7	105,2	49,8	94	9,6	234,4	18,2	73,4
décembre	34,2	14,8	51,5	12,3	7,1	115	159,6	85,2	33,8	9,6	30,8	50,4
Somme	559,1	445,4	700,4	733,6	635,2	472,6	978,1	578,9	278,6	961	371,8	610,4
écart type												223,4

Tabl. 2 - Cumuls des hauteurs de pluie mensuelle et moyenne annuelle et interannuelle mensuelle (période 1990-2000).

Sur la période considérée, la pluviométrie de l'année 1998 est fortement déficitaire par rapport à la moyenne (1990-2000). La pluviométrie de l'année 1993 est excédentaire par rapport à la moyenne (1990-2000). De toutes les années de cette période, les hauteurs de pluie mensuelles de l'année 1998 sont globalement toutes déficitaires (excepté 1998 + 0,6 mm/moyenne, cf. tabl. 2). En 1993, les mois d'avril, mai, juin, juillet et août sont déficitaires par rapport à la moyenne.

	année 93/moy	année 98/moy	année 99/moy	année 00/moy
janvier	-52,2	-43,4	12,8	3,0
février	9,7	-25,7	-48,7	-46,9
mars	46,5	-28,6	-10,2	-25,2
avril	64,3	0,6	7,4	-2,8
mai	-40,8	-23,2	100,2	-6,4
juin	-17,3	-33,4	-15,6	-11,4
juillet	-10,4	-10,0	-10,0	2,0
août	-16,7	-0,3	55,7	-21,5
septembre	24,1	-1,1	151,7	-58,1
octobre	49,2	-86,4	-13,0	3,4
novembre	104,8	-63,8	161,0	-55,2
décembre	-38,1	-16,6	-40,8	-19,6

Tabl. 3 - Comparaison de la pluviométrie mensuelle de 1993, 1998, 1999 et 2000 par rapport à la pluviométrie interannuelle mensuelle (période 1990-2000).

5.5. RECONSTITUTION PAR CONVOLUTION DE LA CHARGE HYDRAULIQUE DE CERTAINS POINTS D'EAU SUIVIS EN CONTINU

Une reconstitution des chroniques de piézométrie a été effectuée pour les années antérieures à la période d'observation à partir des données de pluies et des fonctions de transfert déterminées lors de l'analyse du signal des suivis en continu. Une reconstitution n'a pas été possible pour la source de la Vise, une fonction de transfert pour ses variations de charge hydraulique vis-à-vis des précipitations n'ayant pu être déterminée.

Ces reconstitutions ont été effectuées pour les points suivants : source d'Ambressac, source de Cauvy, forages thermaux de reconnaissance F3 et F4, forages P4 et Tennis. Disposant de données enregistrées pour le forage Tennis sur les périodes 1990 à 2000, les reconstitutions effectuées ont pu être comparées aux données mesurées et la démarche a ainsi été validée.

Dans la simulation de reconstitution de la piézométrie du forage F4, on montre que le niveau piézométrique du forage F4 à la fin de l'été 1993 est similaire à celui observé en fin d'été en décembre 1998 (fig. 29). La contribution de la composante thermique au cours de ces périodes est minimale. Par ailleurs, ces simulations semblent indiquer que les niveaux d'eau à cette période sont bas, les niveaux étant similaires à ceux observés en fin d'été 1998 (année la plus fortement déficitaire de toute la période).

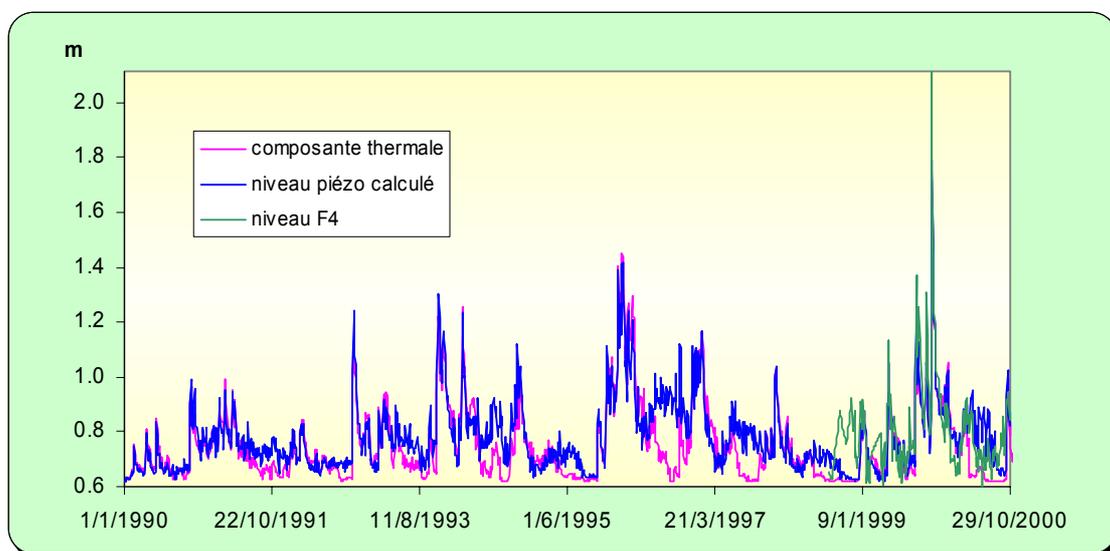


Fig. 29 - Reconstitution de la contribution de la composante thermique et des variations piézométriques de l'eau du forage F4 (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert).

Les modélisations réalisées sur les points Cauvy, F3 et P4 indiquent que les niveaux piézométriques en fin d'été 1993 (septembre 1993) sont bas, mais sont globalement supérieurs à ceux observés en fin d'été 1998 (année la plus fortement déficitaire de toute la période (fig. 30 à 33).

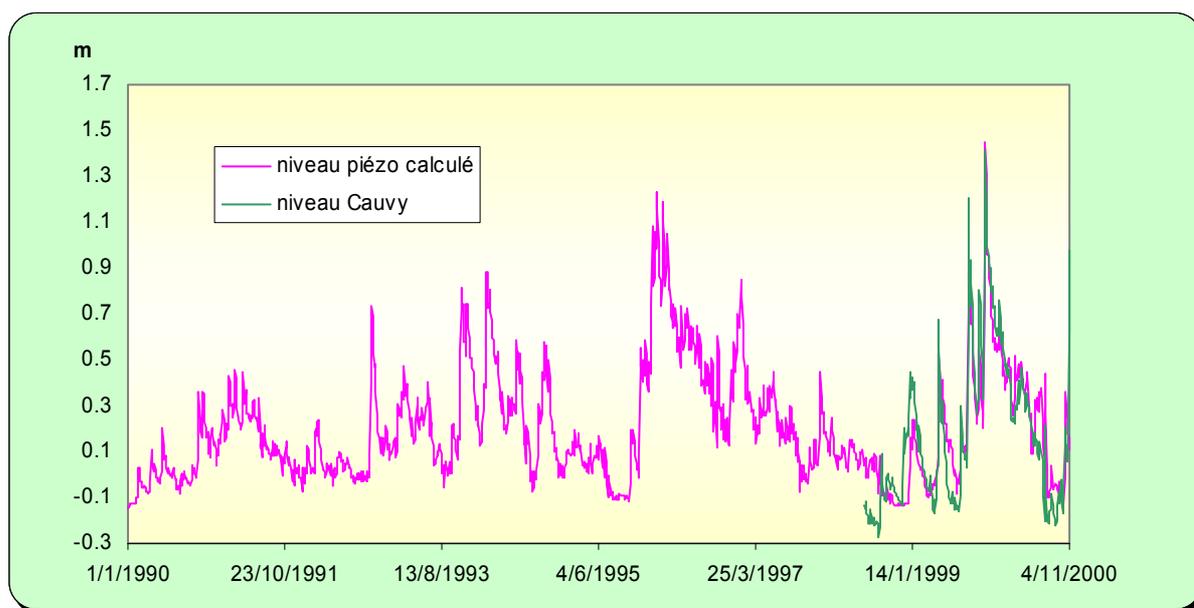


Fig. 30 - Reconstitution des variations piézométriques de la source de Cauvy (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert).

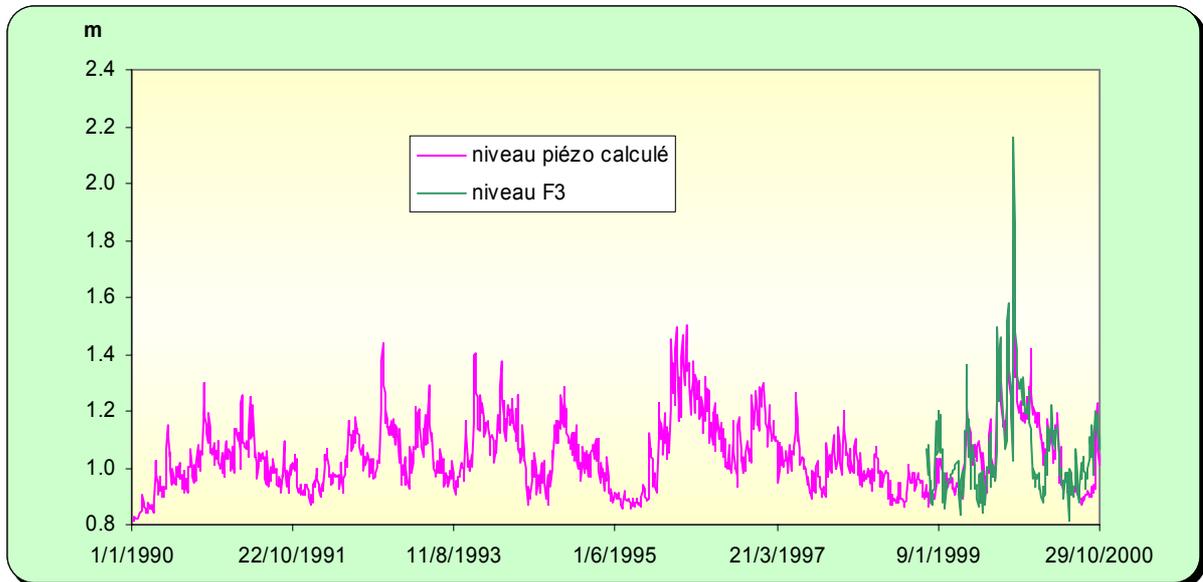


Fig. 31 - Reconstitution des variations piézométriques de l'eau du forage F3 (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert).

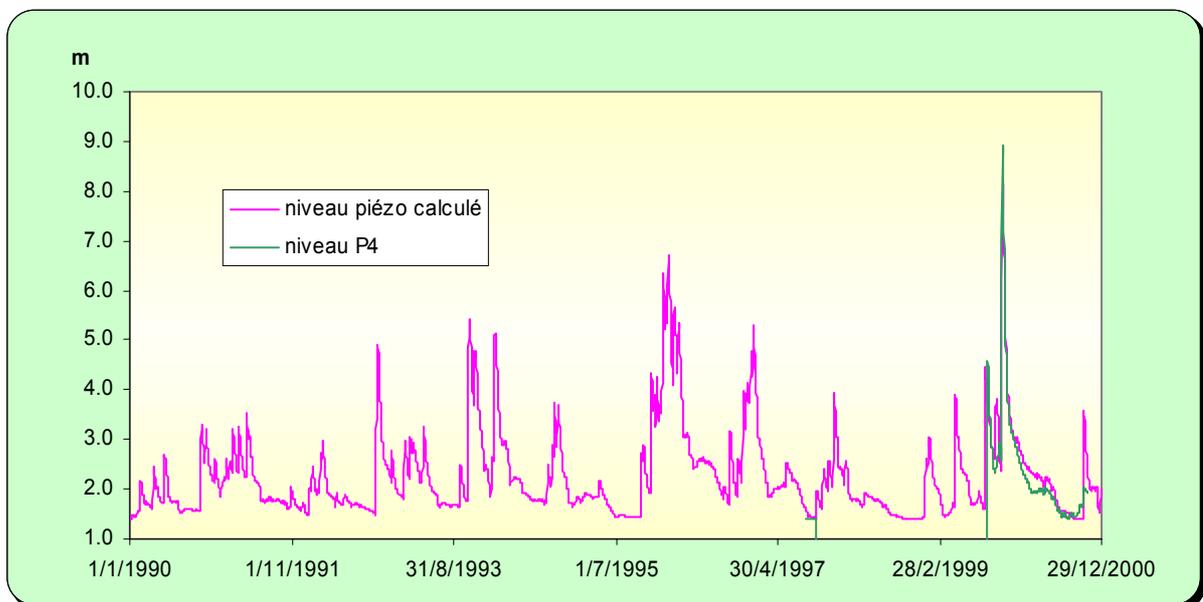


Fig. 32 - Reconstitution des variations piézométriques de l'eau du forage P4 (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert).

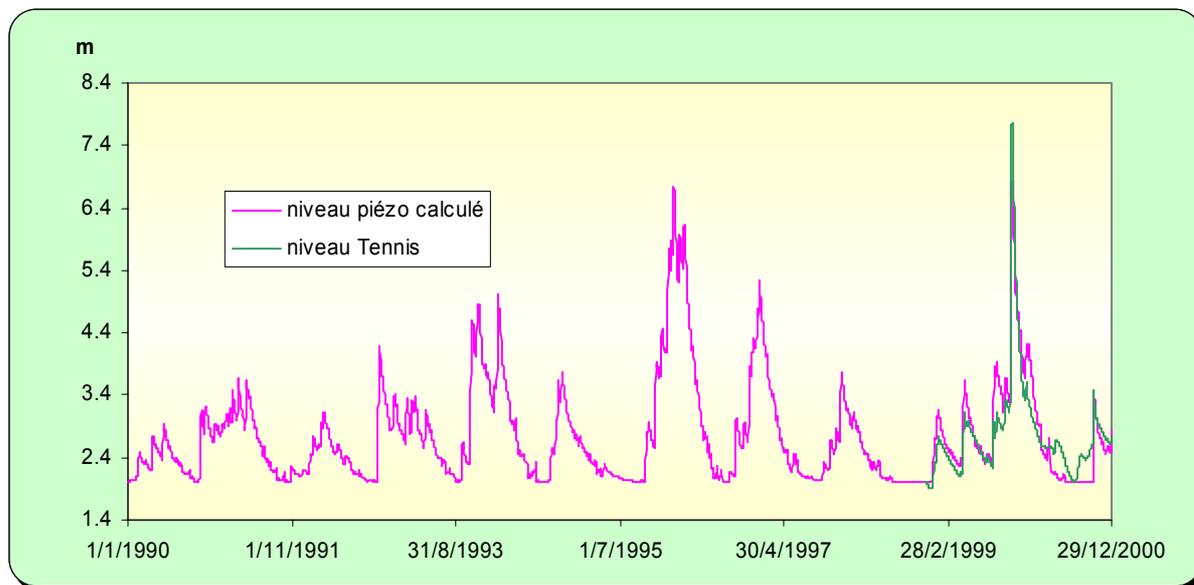


Fig. 33 - Reconstitution des variations piézométriques de l'eau du forage Tennis (période 1990-2000). Les niveaux piézométriques mesurés sont également reportés (vert).

5.6. MOTEUR DES PROCESSUS POSSIBLES D'INVERSAC

Les conditions hydrologiques de la fin d'été 1993 n'étaient pas plus sévères que celles observées en 1998. Les problèmes de modifications des propriétés de l'eau des forages thermaux et de salinité sur la source de Cauvy en 1993 seraient liés à une modification de l'équilibre hydraulique de l'hydrosystème par une intervention sur le dispositif en place sur la source sous-marine de la Vise. Les conditions hydrologiques auraient été un élément favorable à la perturbation de l'hydrosystème, mais non l'élément responsable du phénomène.

La désobstruction d'un système qui au niveau de la source sous-marine de la Vise, est en charge, provoquerait une modification de la répartition des charges hydrauliques au niveau de l'hydrosystème. La continuité hydraulique ayant été montrée au niveau de la presqu'île de Balaruc, une modification de la charge hydraulique au niveau de la Vise pourrait donner lieu à des perturbations du système. Toute variation des charges hydrauliques sur le système au niveau de l'exutoire, point bas de convergence des écoulements, serait prépondérante. Au moment de l'intervention sur la cloche de la source de la Vise, la charge hydraulique naturelle était basse ; la moindre modification des conditions d'équilibre du système se voit avoir un effet d'autant plus important. On ne peut exclure une pénétration d'eau de l'étang à ce niveau. Cette intrusion d'eau saumâtre ne peut, du fait du contexte hydrogéologique, occasionner des grandes perturbations sur les forages thermaux et sur les autres sources. Ces perturbations seraient plutôt dues à une intrusion d'eau marine sous l'effet d'un déséquilibre hydraulique de l'ensemble de l'hydrosystème. La figure 34 illustre ces propos.

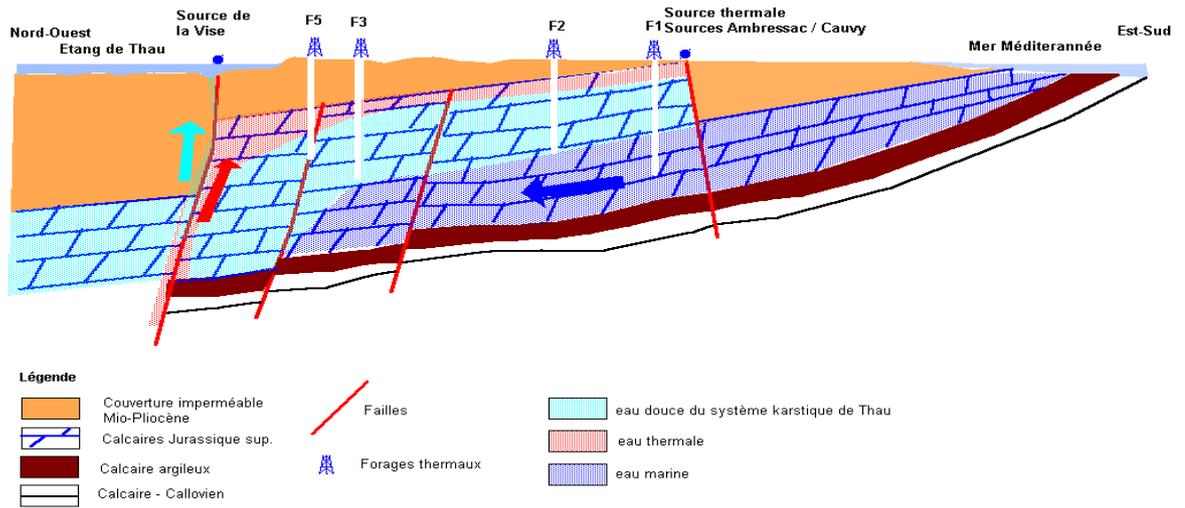


Fig. 34 - Schéma explicatif d'intrusion saline au niveau du réservoir thermal.

6. Proposition de suivi de prévention des situations à risques hydrosystèmes souterrains du système de Thau

Au vu des résultats de cette étude, il apparaît clairement qu'il est nécessaire de disposer de modalités de suivi de l'hydrosystème que constitue la partie nord-orientale de l'étang de Thau, comprenant notamment le système karstique de Thau et le réservoir thermal.

La complexité structurale du système karstique aquifère et le manque d'informations concernant les propriétés hydrauliques du réservoir thermal notamment, font que les éléments de suivi proposés n'appartiennent pas à la catégorie des modèles de gestion et de prédiction.

L'interprétation des chroniques de suivi des paramètres physico-chimiques aux différents points et notamment au niveau de la source de la Vise autour de laquelle les problèmes antérieurs se sont focalisés, n'a pas permis d'identifier toutes les fonctions de transfert nécessaires pour reconstituer les chroniques antérieures. Ainsi même une modélisation globale n'est pas envisageable.

Les éléments de gestion proposés dans le cadre de cette étude en terme de résultats majeurs concernent un réseau de suivi de points singuliers et des niveaux d'alerte ou de surveillance accrue.

6.1. DIMENSIONNEMENT D'UN RÉSEAU DE SUIVI

Au vu des particularités hydrogéologiques de la presqu'île de Balaruc-les-Bains, du fonctionnement des principales sources notamment influencées par le réservoir thermal, il apparaît important que les points d'eau devant appartenir au réseau de suivi comprennent les principales sources de la presqu'île et les forages thermaux.

Les points du réseau et les arguments justifiant le choix du point figurent dans le tableau ci-dessous :

Dénomination du point d'eau	Arguments	Remarques
Source de la Vise	<ul style="list-style-type: none">- Point central des conflits antérieurs- Convergence des eaux souterraines karstiques d'Aumelas, La Gardiole et de la presqu'île et des eaux influencées par le thermalisme	Suivi préconisé de la température directement au niveau du griffon

Source de Cauvy	Exutoire influencé par le thermalisme ; connexion hydraulique avec les forages thermaux possibles selon les niveaux de charges et l'influence des pompages	
Source d'Ambressac	Exutoire influencé par le thermalisme mais aussi composante eaux karstiques de la Gardiole	Le site où se trouve la source a fait l'objet d'une vente – négocier l'accès et l'installation d'appareil avec les nouveaux propriétaires.
Forage de reconnaissance thermique F4	Suivi du réservoir thermal	Connexion hydraulique possible avec Cauvy, inversion de gradient (?). Un seul des deux forages suffit au vu de leur comportement.
Forages sur la presqu'île Tennis et P4	Suivi des évolutions au niveau amont de la presqu'île de Balaruc	

Les paramètres à suivre en ces différents points sont : les variations d'hauteur d'eau, la température et la conductivité électrique de l'eau. Ces points ont été équipés dans le cadre de cette étude. À noter que la station de la Vise est en place mais que le dispositif de mesure n'est plus opérationnel. De plus, la station d'Ambressac a été démontée à la demande du propriétaire du terrain.

En plus du suivi de paramètres physico-chimiques sur ces différents points, il est utile d'intégrer à ce dispositif deux plongées annuelles au niveau du gouffre de la Vise afin de suivre l'évolution de l'envasement de ce dernier (plongées avec photos ou vidéo). Un envasement trop sévère pourrait conduire à une intervention humaine sur le dispositif de pompage du GAEC des « Poissons du Soleil ».

Des bulletins d'information des suivis devraient être édités trimestriellement ou semestriellement par l'administration ou le bureau d'étude en charge de cette mission, pour diffusion en premier lieu à la MISE, au CG34, au syndicat des professionnels des pêcheurs et aux exploitants des thermes.

Des bulletins d'alerte assortis de procédure à mettre en œuvre sont édités en fonction de l'évolution des suivis.

6.2. INTERPRÉTATION DES SUIVIS, PRÉVENTION DES SITUATIONS À RISQUES

L'objectif d'un tel réseau de suivi est de pouvoir déclencher des procédures d'alerte dans les situations dites à risques. Ces situations à risques sont les suivantes :

- étiages sévères,
- étiages sévères et influence anthropique sur l'hydrosystème :
 - modification brutale du dispositif actuel de pompage de la Vise ;
 - augmentation des prélèvements individuels ;
 - augmentation des prélèvements pour l'approvisionnement en eau potable.

Les niveaux d'alerte des différents points de suivi sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Dénomination du point d'eau	Niveaux d'alerte	Remarques
Source de la Vise	<ul style="list-style-type: none"> - hauteur d'eau : diminution brutale en quelques jours du niveau pour atteindre la charge corrigée de 20 cm, NGF - conductivité électrique : Augmentation de la conductivité supérieure à 50 % de la valeur mesurée. - température : Diminution de la température de l'ordre de 5 %. 	- vérifier que le dispositif puisse mesurer la température directement au niveau du griffon.
Source de Cauvy	<ul style="list-style-type: none"> - hauteur d'eau : surveiller le gradient entre Cauvy et les forages thermaux - conductivité électrique : variation supérieure à 50 % 	Attention aux inversions potentielles de gradients entre les forages thermaux et Cauvy
Forages de reconnaissance thermique – F3 et F4	<ul style="list-style-type: none"> - hauteur d'eau : 0,6 m (3) et 0,5 m (4) - conductivité électrique : variation de 5 % à la baisse - température : diminution de la température de l'ordre de 5 %. 	Attention aux inversions potentielles de gradients entre les forages thermaux et Cauvy
Forages sur la presqu'île Tennis et P4	<ul style="list-style-type: none"> - hauteur d'eau : inférieure à 1 m (P4) et à 1,5 m (Tennis) - conductivité électrique : supérieure à 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) 	<ul style="list-style-type: none"> - niveau d'étiage sévère - indice de contamination par eau salée.

Les périodes les plus sensibles sont liées aux périodes d'étiage sévères. La diminution de la charge de la Vise a été observée de manière récurrente lors des périodes d'observation : diminution relativement brutale de la charge de l'aquifère au cours du printemps et une remontée rapide à l'automne.

Une variabilité temporelle de la conductivité de l'eau de la Vise est observée. On montre notamment que la conductivité augmente suite aux épisodes de pluie.

Dans l'un de ces cas, il convient dans un premier temps de délivrer un bulletin d'alerte aux intéressés par un cheminement adéquat (via la MISE) et d'interdire toute utilisation des pompes individuelles dans la nappe calcaire au niveau de Balaruc-les-Bains pour des besoins tels qu'arrosage des jardins, piscine, etc. Le levé de l'interdit pourrait intervenir si au demeurant l'évolution des niveaux enregistrés se stabilise ou se poursuit sur un des points sans que les autres réagissent. Le levé de l'interdit sera progressif avec une période de restriction des usages de l'eau privés tant que la période sera jugée critique (seuil dépassé).

Un suivi particulier devra être réalisé du réseau d'alerte au niveau des variations brutales de charge de la source de la Vise. La relation de cause à effet des variations de charge au niveau du barrage de la Vène à Issanka et des variations de la Vise a été évoqué dans le cadre de cette étude, mais n'a pu être vérifiée. Une fois le système de suivi de la Vise de nouveau opérationnel, les données enregistrées au niveau de la Vène à Issanka pourront être récupérées auprès de la CGE de Frontignan. L'observation corrélative des charges à Issanka au niveau du barrage sur la Vène et de la source de la Vise devrait permettre d'élucider ces brusques variations de charge enregistrées à la Vise. Si une cause à effet est mise en évidence, les données de suivi du niveau d'eau du barrage de la Vène à Issanka devraient être intégrées dans le réseau d'alerte.

7. Conclusion

Le besoin d'approfondir les connaissances géologiques et hydrogéologiques au niveau du pourtour nord-est de l'étang de Thau était un point noté essentiel pour apporter des éléments relatifs au conflit d'usage de la ressource de l'eau qui ont existé.

Le pourtour septentrional et oriental de l'étang de Thau est situé dans un environnement géologique et hydrogéologique complexe. Cette complexité s'exprime à travers les sources ou exutoires karstiques influencées par le réservoir thermal, telles que la source de la Vise, Ambressac et Cauvy, mais aussi par la mise en évidence d'une zone de disharmonie profonde au niveau des formations sédimentaires reposant sur le socle. Les études géologiques ont permis de synthétiser les connaissances sur ce secteur de l'étang.

Le suivi hydrologique de différents points d'eau clefs tels que forages thermaux, sources et autres forages de référence a permis à la lumière également de l'interprétation des analyses hydrochimiques et isotopiques, d'apporter des éléments concernant le fonctionnement de l'hydrosystème en présence. Un schéma conceptuel est proposé indiquant le rôle présumé du réservoir thermal et l'organisation des écoulements souterrains.

De plus, la détermination de fonctions de transferts à l'aide de l'analyse du signal effectuée sur les séries chronologiques (niveaux d'eau et conductivité électrique de l'eau) a permis de simuler les niveaux d'eau pour les années précédentes et de reconstituer les niveaux de 1993. Force de constater que ces niveaux ne sont pas inférieurs à ceux enregistrés en 1998, année plus déficitaire en eau que 1993 à l'échelle de la fenêtre d'observation 1990-2000.

Cette étude a permis de fournir une explication plausible des événements survenus en 1993 : l'équilibre de l'hydrosystème a été perturbé lorsque la cloche qui coiffait la source de la Vise et maintenait la charge du système, a été enlevée. Cette perturbation a eu lieu en période de basses eaux, rendant le système encore plus sensible aux variations de charge hydraulique ; ce déséquilibre a pu provoquer une intrusion d'eau marine et non de l'étang afin de tendre à nouveau vers un équilibre.

Enfin, une proposition de réseau de suivis a été formulée au terme de cette étude ; il devra être géré par la structure adéquate. Des niveaux d'alerte pour les points d'eau retenus et des procédures à suivre sont indiqués.

Bibliographie

- Bérard P. (1995) - Le bassin de Thau (Hérault) – Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques. Rapport BRGM R38538. Juillet 1995.
- DIREN (1999) - Étude des eaux souterraines du pourtour est de l'étang de Thau - Phase 1. Rapport de synthèse + Annexes. Conseil général de l'Hérault, Agence de l'eau RMC, BRGM LRO, DIREN LR, DDAFF Hérault. Juillet 1999.
- Doerfliger N., Le Strat P. (2001) - Étude du pourtour est de l'étang de Thau, phase II. Définition du modèle géologique et inventaire des phénomènes karstiques, Volume 1. BRGM/RP-50786-FR, 140 p., 11 fig., 5 ann.
- Ladouche B., Bakalowicz M., Courtois N., Doerfliger N., Pinault J.-L., Chemin P. et Anus S. (2001) - Étude du pourtour est de l'étang de Thau, phase II. Volume 2. Fonctionnement hydrogéologique du bassin karstique de Thau. BRGM/RP-50787-FR, 185 p., 115 fig., 3 ann.
- Ladouche B., Doerfliger N., Bakalowicz M. (2001) - Étude du pourtour est de l'étang de Thau, phase II. Caractérisation hydrochimique des réservoirs souterrains karstiques et hydrothermaux. Volume 3. BRGM/RP-50788-FR, 64 p., 14 fig., 5 tabl., 4 ann.
- Paloc H. (1986) - Inventaire des circulations d'eau souterraine démontrées par traçages dans les aquifères calcaires des départements de l'Hérault et du Gard. Essai de recensement au 31 octobre 1986. Rapport BRGM 86 LRO 672 PR. Octobre 1986.

BRGM
SERVICE EAU
Unité Évaluation de la Ressource, Milieux discontinus
BP 6009 – 45060 Orléans cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34