



Surveillance de la qualité des eaux souterraines sur un bassin karstique en région Centre : les Trois Fontaines

Rapport final

BRGM/RP-52931-FR
juin 2004



Région Centre



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Surveillance de la qualité des eaux souterraines sur un bassin karstique en région Centre : les Trois Fontaines

Rapport final

BRGM/RP-52931-FR

juin 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Recherche du BRGM 2004-ANA-12

N. Guigues, J. C. Foucher, S. Roy

Avec la collaboration de

F. Jouin, G. Braibant, M. Brach

Mots clés : *In situ*, Monitoring, Sonde multiparamètre, Nitrates, Phytosanitaires, Échantillonnage, Eau souterraine, Bassin karstique, Région Centre.

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

Guigues N., Foucher J.C., Roy S. (2004) – Surveillance de la qualité des eaux souterraines sur un bassin karstique en région Centre : les Trois Fontaines. BRGM/RP-52931-FR, 73 p., 62 ill., 1 ann.

Synthèse

La notion de mesure appliquée aux polluants chimiques dans les milieux naturels, ainsi que la confiance que l'on se doit d'accorder aux valeurs fournies par ces mesures, sont devenues un des fondements des démarches appliquées à l'environnement. Par ailleurs, la demande de la société sur ces aspects a atteint un tel niveau (exemples : ozone dans l'air, risque sanitaire dans nos assiettes, nitrates et phytosanitaires dans les eaux souterraines, perturbateurs endocriniens dans nos rivières...) que les politiques publiques se doivent d'y répondre de manière simple, rapide et sûre.

Les nombreux débats générés sur ces problèmes récurrents ont entraîné l'apparition, depuis quelques années, de nouvelles thématiques de Recherche et Développement, notamment au sein des instituts de recherche, qu'ils soient nationaux, européens ou même nord-américains.

Au sein du BRGM, ces thématiques de meilleure connaissance de la signification d'une mesure et des impacts humains sur son environnement, sont regroupées sous l'appellation « Métrologie de l'environnement ». Cette thématique globale a pour objectif de souligner les nécessaires et indispensables liens qui doivent exister entre la science de la mesure appliquée aux analyses chimiques, le milieu environnemental et les décideurs locaux et nationaux, et notamment autour d'un des compartiments majeurs de notre environnement quotidien, que sont les eaux naturelles.

Dans ce cadre, le BRGM, avec le soutien financier de la région Centre, a décidé en 2001 et pour une durée de trois ans, de créer un projet de R&D nommé « Métrologie de l'environnement », appliqué d'une part, au développement de systèmes de surveillance de la qualité des eaux, et d'autre part à la mise en exergue des aspects qualité et innovation reliés à la notion de mesure.

Ce projet a fait l'objet d'un premier rapport d'avancement référencé « Mesure *in situ* en continu des concentrations en nitrates dans les eaux naturelles de la région Centre, rapport d'avancement BRGM/RP-51852-FR ». Il concernait plus particulièrement les aspects de validation analytique de sondes multiparamètres développées au sein du BRGM dans les années antérieures. Ces sondes ont la capacité d'enregistrer, *in situ* et en continu, différents paramètres physico-chimiques reliés à la qualité des eaux souterraines. En outre, la surveillance des teneurs en ions nitrates, polluant majeur et persistant de nos réserves en eau potable, est accessible par ces appareillages. Les développements réalisés, les raisonnements mis en place ainsi que l'application de méthodologies spécifiques sur le terrain, décrits dans ce premier rapport, permettront à terme d'accéder à des modélisations scientifiques de qualité et donc des prédictions fiables.

Le second rapport d'avancement, référencé « Mise en place d'un mini-réseau de surveillance de la qualité des eaux sur un bassin karstique en région Centre : les Trois

Fontaines. BRGM/RP-52337-FR » a été rendu le 27 mai 2003, lors de la tenue du comité de pilotage du projet. Il est la suite logique du premier rapport car principalement axé sur la faisabilité de mise en place d'un mini-réseau de surveillance des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines via les sondes multiparamètres BRGM, à l'échelle d'un bassin hydrogéologique, d'une superficie d'environ 50 km², situé dans l'est du département du Loiret (principalement sur la commune de Chuelles). C'est un bassin, à dominante karstique, soumis à des pressions d'origines agricoles intenses et dont l'exutoire majoritaire fait l'objet d'un captage partiel par la SAUR.

Par ailleurs, les mesures de paramètres physico-chimiques en fonction de la profondeur réalisées dans plusieurs puits (diagraphie), permettent d'obtenir une vision rapide des écoulements majeurs et des transferts de polluants dans la nappe. Elles permettent également de mettre en évidence des couches d'eau non homogènes dans certains puits et notamment pour les ions nitrates.

Enfin, le rapport présenté ci-après, constitue le troisième et dernier du projet « Métrologie de l'environnement » entre le BRGM et la région Centre. Il correspond aux travaux réalisés entre les mois de juillet et décembre 2003. Il est plus spécifiquement orienté sur les méthodes de prélèvements et d'échantillonnage spécifiques aux eaux souterraines qui doivent être développées pour assurer une meilleure représentativité de l'échantillonnage et ainsi permettre une évaluation fiable de leur qualité.

Ainsi, des hétérogénéités chimiques en fonction de la profondeur ont été mises en évidence dans certains puits de ce bassin, notamment pour les ions nitrates et certaines molécules phytosanitaires.

Ainsi, en terme de surveillance de la qualité des eaux souterraines, des résultats très contrastés seront obtenus si ces hétérogénéités spatiale et temporelle de la qualité de l'eau ne sont pas prises en compte. Il semble alors opportun de disposer de capteurs pour la mesure *in situ* de ces composés organiques d'origine agricole. Ces méthodologies alternatives permettraient de s'affranchir des étapes de prélèvements et ainsi de minimiser les biais souvent observés sur les mesures réalisées par les laboratoires de surveillance. Implantées dans plusieurs puits à différentes profondeurs, ces capteurs chimiques permettraient alors une surveillance précise et fiable de la qualité des eaux souterraines à l'échelle d'un bassin versant en accord avec les demandes de la Directive Cadre Européenne sur les eaux (décembre 2000) et la future Directive Fille sur les eaux souterraines.

Enfin, le projet de développement d'un système de transmission des données en temps réel par radio-fréquence, avec la société ATCOM (Chécy) est toujours à l'étude.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Description du site	13
2.1. DESCRIPTION DU SITE	13
2.2. MISE EN PLACE DU RÉSEAU	14
2.2.1. Choix des puits du bassin karstique des Trois Fontaines.....	14
2.2.2. Instrumentation de la source et des trois puits	14
2.3. PROCÉDURE DE SUIVI TEMPOREL	20
3. Caractérisation du milieu et représentativité des mesures	23
3.1. VARIABILITÉ SPATIALE DE LA QUALITÉ DES EAUX.....	23
3.1.1. À l'échelle du bassin	23
3.1.2. À l'échelle d'un puits	29
3.2. VARIABILITÉ TEMPORELLE DE LA QUALITÉ DES EAUX.....	41
3.2.1. À l'échelle du bassin	41
3.2.2. À l'échelle d'un puits	42
4. Suivi en continu des paramètres physico-chimiques et de la concentration en chlorures et nitrates	49
4.1. CONDUCTIVITÉ ET TEMPÉRATURE	49
4.1.1. La source des Trois Fontaines.....	49
4.1.2. La Bissaugerie	49

4.1.3. Les Glandons	49
4.1.4. Les Grands Pressoirs	50
4.2. CHLORURES ET NITRATES	55
4.2.1. Source des Trois Fontaines.....	55
4.2.2. La Bissaugerie.....	55
4.2.3. Les Glandons	56
4.2.4. Les Grands Pressoirs	56
5. Conclusion.....	65
Bibliographie	67
Annexe - Composition chimique des échantillons prélevés lors de la campagne de novembre-décembre 2003	69

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation géographique du système hydrographique des Trois Fontaines (Loiret, 45), d'après Baran <i>et al.</i> , 2000.....	13
Illustration 2 - Carte topographique du bassin des Trois Fontaines et emplacement des puits sélectionnés pour le suivi en continu de la qualité des eaux (en orange) et pour l'évaluation de l'hétérogénéité spatiale de la qualité des eaux (en rose).	14
Illustration 3 - Source des Trois Fontaines – vue du préleveur automatique et de la sonde multiparamètre.....	15
Illustration 4 - Source des Trois Fontaines – vue du préleveur automatique et de la sonde multiparamètre.....	15
Illustration 5 - Schéma d'installation de la sonde multiparamètre et du préleveur automatique dans les différents puits du bassin des Trois Fontaines.	16
Illustration 6 - Puits de la Bissaugerie – vue de la sonde multiparamètre, du préleveur à gaz et du préleveur automatique.....	17
Illustration 7 - Puits des Glandons – vue de la sonde multiparamètre, du préleveur à gaz et du préleveur automatique.....	17
Illustration 8 - Puits des Grands Pressoirs – vue de la sonde multiparamètre et du préleveur automatique.....	18
Illustration 9 - Puits des Grands Pressoirs – vue de la sonde multiparamètre, du préleveur à gaz et du préleveur automatique.....	18
Illustration 10 - Sonde multiparamètre BRGM – vue des capteurs.....	19
Illustration 11 - Carte de la conductivité et des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003).	24
Illustration 12 - Composition relative en cations des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003). Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l, afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.....	25
Illustration 13 - Composition relative en anions des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003). Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l, afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.....	26
Illustration 14 - Relation entre la teneur en calcium et la conductivité dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (n = 39).....	26
Illustration 15 - Relation entre la teneur en calcium et la teneur en bicarbonates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (n = 39).	27
Illustration 16 - Carte des teneurs relative en atrazine, déséthylatrazine (DEA) et désisopropylatrazine (DIA) dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003).....	28

Illustration 17 - Concentrations relatives en pesticides dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003). Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.	29
Illustration 18 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Trois Chapeaux.	30
Illustration 19 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Jobards.	30
Illustration 20 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Hirlais.	31
Illustration 21 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Grands Pressoirs.	31
Illustration 22 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Grands Buissons.	32
Illustration 23 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits de la Tournerie.....	32
Illustration 24 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits de la Bissaugerie.	33
Illustration 25 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Glandons.....	33
Illustration 26 - Carte des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003), prélevées à trois profondeurs.	34
Illustration 27 - Relation entre la conductivité et la teneur en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines – tous puits confondus.....	35
Illustration 28 - Profil conductivité et concentration en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (1).....	36
Illustration 29 - Profil conductivité et concentration en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (2).....	37
Illustration 30 - Cartes des teneurs en pesticides (atrazine + DEA + DIA) dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003), prélevées à trois profondeurs.	38
Illustration 31 - Profil conductivité et concentration en pesticides dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (1).....	39
Illustration 32 - Profil conductivité et concentration en pesticides dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (2).....	40
Illustration 33 - Profil conductivité et concentration en pesticides dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (3).....	40
Illustration 34 - Composition relative en cations des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines sur la période juillet 2002-décembre 2003. Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l, afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.....	41

Illustration 35 - Composition relative en anions des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines sur la période juillet 2002-décembre 2003. Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l, afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.	42
Illustration 36 - Évolution dans le temps du niveau piézométrique sur le bassin des Trois Fontaines.....	43
Illustration 37 - Évolution des diagraphies des paramètres physico-chimiques dans le temps – Puits de la Bissaugerie.	45
Illustration 38 - Évolution des diagraphies des paramètres physico-chimiques dans le temps – Puits des Glandons.	46
Illustration 39 - Évolution des diagraphies des paramètres physico-chimiques dans le temps – Puits des Grands Pressoirs.	47
Illustration 40 - Suivi en continu de la température – Source des Trois Fontaines.	51
Illustration 41 - Suivi en continu de la conductivité à 25 °C et mesures ponctuelles – Source des Trois Fontaines.	51
Illustration 42 - Suivi en continu de la température – Puits de la Bissaugerie.....	52
Illustration 43 - Suivi en continu de la conductivité à 25 °C et mesures ponctuelles – Puits de la Bissaugerie.	52
Illustration 44 - Suivi en continu de la température – Puits des Glandons.	53
Illustration 45 - Suivi en continu de la conductivité à 25 °C et mesures ponctuelles – Puits des Glandons.	53
Illustration 46 - Suivi en continu de la température – Puits des Grands Pressoirs.....	54
Illustration 47 - Suivi en continu de la conductivité à 25 °C et mesures ponctuelles – Puits des Grands Pressoirs.....	54
Illustration 48 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en chlorures – Source des Trois Fontaines.....	58
Illustration 49 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en chlorures – Puits de la Bissaugerie.	58
Illustration 50 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en chlorures – Puits des Glandons.....	59
Illustration 51 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en chlorures – Puits des Grands Pressoirs.....	59
Illustration 52 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en nitrates – Source des Trois Fontaines.....	60
Illustration 53 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en nitrates – Puits de la Bissaugerie.	60

Illustration 54 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en nitrates – Puits des Glandons.	61
Illustration 55 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en nitrates – Puits des Grands Pressoirs.	61
Illustration 56 - Évolution de la pente et du Eo de l'électrode sélective nitrate dans le temps – Source des Trois Fontaines.	62
Illustration 57 - Évolution de la pente et du Eo de l'électrode sélective nitrate dans le temps – Puits de la Bissaugerie.....	62
Illustration 58 - Évolution de la pente et du Eo de l'électrode sélective nitrate dans le temps – Puits des Glandons.....	63
Illustration 59 - Évolution de la pente et du Eo de l'électrode sélective nitrate dans le temps – Puits des Grands Pressoirs.	63
Illustration 60 - Paramètres physico-chimiques mesurés in situ (diagraphie) lors de la campagne de novembre-décembre 2003.....	71
Illustration 61 - Composition chimique des échantillons prélevés lors de la campagne de novembre-décembre 2003.....	72
Illustration 62 - Teneurs en pesticides dans les échantillons prélevés lors de la campagne de novembre-décembre 2003.....	73

1. Introduction

Le bassin hydrogéologique des Trois Fontaines est situé dans l'est du département du Loiret, à quelques kilomètres de Montargis, principalement sur la commune de Chuelles. Ce bassin est un système karstique, d'une superficie d'environ 50 km², soumis à des pressions d'origine agricoles intenses. En effet, environ 80 % de cette surface est actuellement mis en culture pour la production de céréales notamment. L'exutoire majoritaire de ce bassin versant fait l'objet d'un captage partiel par la SAUR pour la mise à disposition d'eaux potables pour la population locale.

Ces pressions anthropiques impliquent le traitement des eaux pompées, car les teneurs en nitrates et en pesticides de ces sources dépassent régulièrement les limites réglementaires relatives aux eaux de consommation humaine (50 mg de nitrates par litre d'eau et 0,1 µg/l par molécule phytosanitaire, décret n° 2001-1220 du 20/12/2001). En effet, des études antérieures ont mis en évidence la présence de plusieurs familles de phytosanitaires notoires dans les eaux souterraines de ce bassin versant telles que l'atrazine et ses métabolites (molécules filles apparaissant lors de la dégradation dans l'environnement de la molécule mère) ou des urées (isoproturon notamment).

Ainsi, depuis juillet 2002, nous avons positionné plusieurs sondes multiparamètres dans différents puits situés en amont de la résurgence majeure de ce bassin, afin de tester un système de surveillance des eaux souterraines, au plus près des zones émettrices de polluants, notamment de suivi en continu des paramètres physico-chimiques et des nitrates.

Par ailleurs, des essais concernant les méthodologies de prélèvements et d'échantillonnage de ces eaux souterraines, vis-à-vis de chaque type de polluant majeur (nitrates et pesticides), ont également été réalisés pour estimer l'homogénéité chimique ou non de chaque colonne d'eau et déterminer la profondeur la plus appropriée pour effectuer un prélèvement dans le cadre d'un suivi de la qualité des eaux ou bien pour positionner des capteurs pour la mesure en continu de certains paramètres.

2. Description du site

2.1. DESCRIPTION DU SITE

Le bassin hydrographique de la source des Trois Fontaines dans le Loiret (45) a été choisi pour conduire un suivi de la qualité des eaux et plus particulièrement de la concentration en nitrates dans la nappe (ill. 1). C'est un système karstique, d'une superficie d'environ 50 km², qui possède deux exutoires principaux : les sources des Trois Fontaines (55 % du débit total) et les sources du Moulin de Loignes (30-40 % du débit total). L'axe de drainage souterrain très marqué d'orientation SE-NW, correspondant à une zone où la perméabilité de la craie est accrue du fait de la karstification. Enfin, la surface agricole utile du bassin représente environ 80 % de la surface totale, avec les céréales comme culture dominante (Lasne, 1992 ; Baran, 1996 ; Baran *et al.*, 2000).

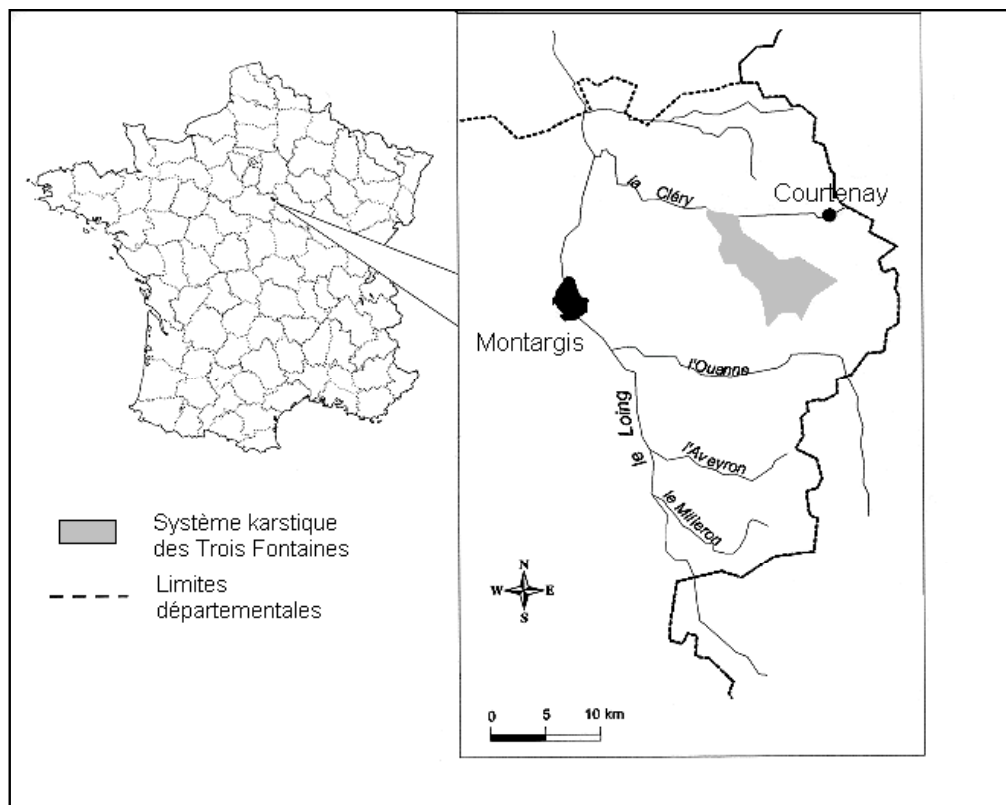


Illustration 1 - Localisation géographique du système hydrographique des Trois Fontaines (Loiret, 45), d'après Baran *et al.*, 2000.

2.2. MISE EN PLACE DU RÉSEAU

2.2.1. Choix des puits du bassin karstique des Trois Fontaines

Deux campagnes de reconnaissance ont été réalisées en mai et en décembre 2002 sur une dizaine de puits du bassin, en s'appuyant en premier lieu sur les résultats obtenus en 1990 par Lasne (1992), dans le but de sélectionner trois puits en tenant compte des teneurs en nitrates mesurées sur site (colorimétrie), mais aussi de l'accessibilité des puits. La source des Trois Fontaines ainsi que les puits des Grands Pressoirs, des Glandons et de la Bissaugerie ont été retenus pour effectuer un suivi temporel de la qualité de l'eau (ill. 2). Les teneurs moyennes en nitrates mesurées sur les quatre sites sont comprises entre 5 et 95 mg/l.

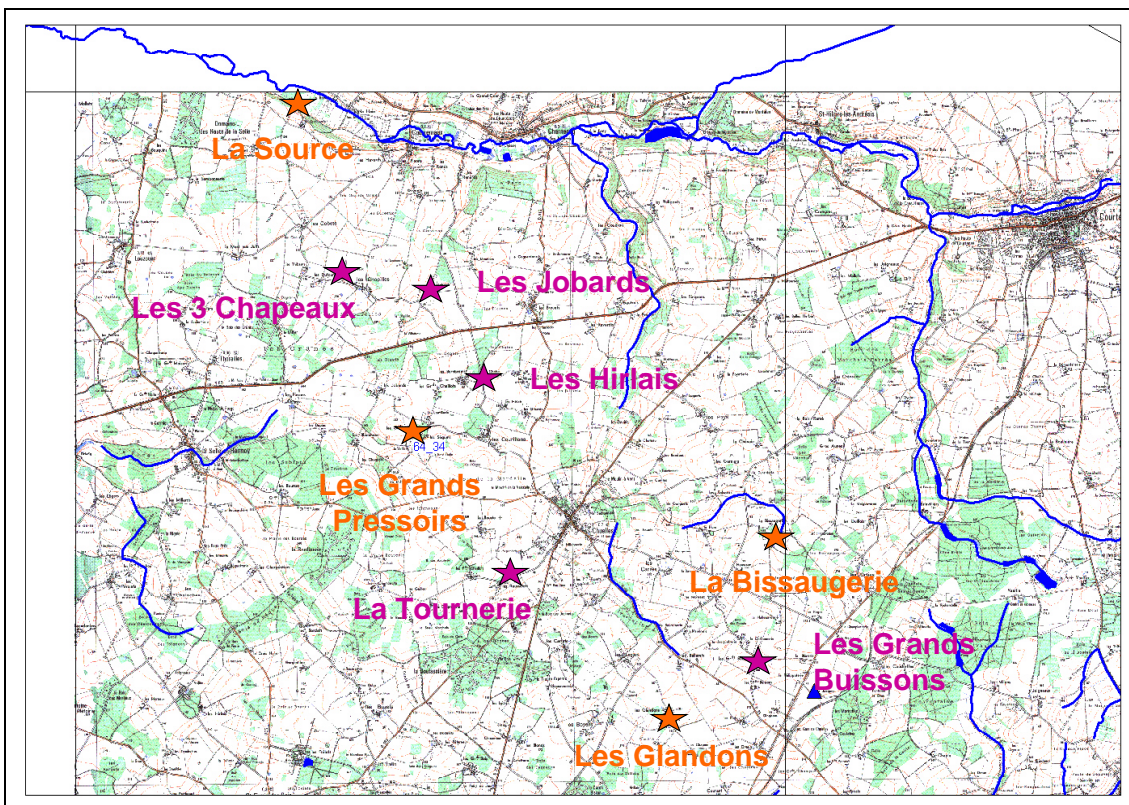


Illustration 2 - Carte topographique du bassin des Trois Fontaines et emplacement des puits sélectionnés pour le suivi en continu de la qualité des eaux (en orange) et pour l'évaluation de l'hétérogénéité spatiale de la qualité des eaux (en rose).

2.2.2. Instrumentation de la source et des trois puits

Chaque site est équipé d'une sonde multiparamètre conçue par le BRGM (voir § sonde multiparamètre), ainsi que d'un préleveur automatique d'échantillon (SIGMA).

a) La source des Trois Fontaines

Une sonde multiparamètre ainsi qu'un préleveur automatique ont été installés en sortie de la station de pompage de la SAUR au niveau de la source principale des Trois Fontaines (ill. 3 et 4).



Illustration 3 - Source des Trois Fontaines – vue du préleveur automatique et de la sonde multiparamètre.



Illustration 4 - Source des Trois Fontaines – vue du préleveur automatique et de la sonde multiparamètre.

b) Les puits

Le préleveur automatique et la sonde multiparamètre sont suspendus au bout d'une corde selon le schéma de l'illustration 5 dans les puits de la Bissaugerie (ill. 6), des Glandons (ill. 7) et des Grands Pressoirs (ill. 8 et 9).

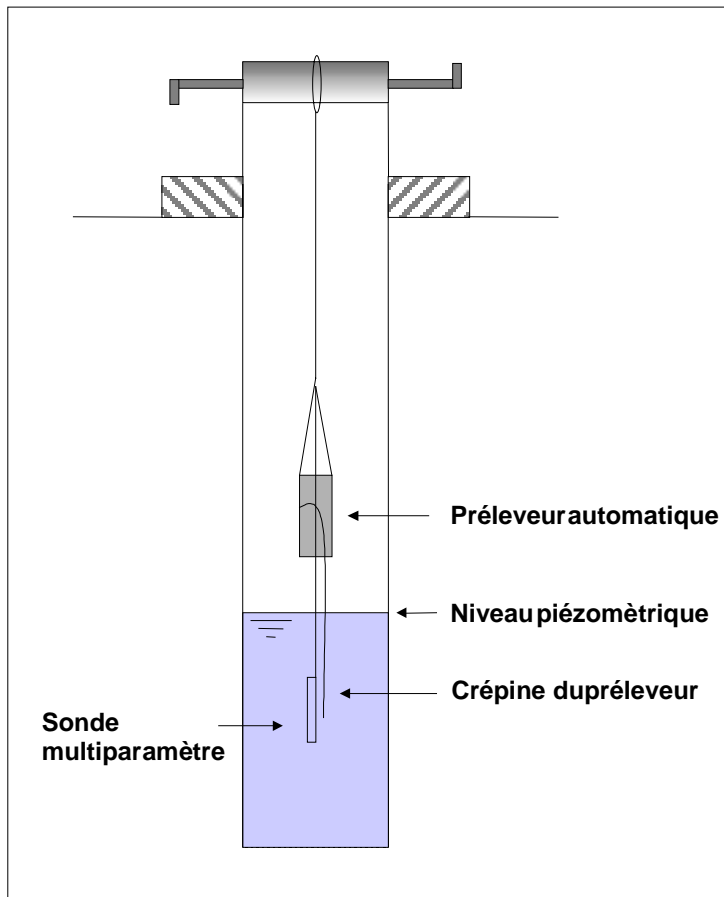


Illustration 5 - Schéma d'installation de la sonde multiparamètre et du préleveur automatique dans les différents puits du bassin des Trois Fontaines.

Les capteurs de la sonde sont environ à 3 m sous le niveau d'eau et la crépine du préleveur est 0,5 m au-dessus des capteurs, afin de limiter les perturbations engendrées par la purge du tuyau de prélèvement avant chaque prélèvement.



Illustration 6 - Puits de la Bissaugerie – vue de la sonde multiparamètre, du préleveur à gaz et du préleveur automatique.



Illustration 7 - Puits des Glandons – vue de la sonde multiparamètre, du préleveur à gaz et du préleveur automatique.



Illustration 8 - Puits des Grands Pressoirs – vue de la sonde multiparamètre et du préleveur automatique.



Illustration 9 - Puits des Grands Pressoirs – vue de la sonde multiparamètre, du préleveur à gaz et du préleveur automatique.

c) Sonde multiparamètre

Quatre prototypes de sonde multiparamètres conçus et réalisés au BRGM, dans le cadre d'un projet de Recherche et Développement, ont été utilisés (ill. 10). Ils sont constitués d'une carte d'acquisition de marque IRIS Instruments. Huit voies analogiques sont dédiées à :

- la conductivité (4 électrodes, 2 voies) ;
- l'oxygène dissous (électrode de Clark, 1 voie) ;
- la température (1 voie) ;
- 4 voies potentiométriques : électrodes sélectives, dont au moins une électrode avec référence combinée (pH généralement).

Ces voies sont scrutées deux par deux de manière séquentielle. La maîtrise complète de l'électronique permet d'interchanger les capteurs, voire de les modifier. Le principal avantage des sondes prototypes BRGM sur les systèmes commerciaux est le nombre de voies pouvant être dédiées à la mesure de concentrations ioniques à l'aide d'électrodes sélectives (jusqu'à 4 électrodes simultanément, dont une électrode avec une référence combinée, généralement le pH). Leur principal inconvénient réside dans le fait que ce sont des prototypes limités techniquement : 10 m d'immersion seulement, fréquence maximale d'acquisition d'un set de paramètres de 12 mn, et que leur mise en œuvre est plus délicate que les modèles du commerce. Cependant, pour une grande partie des applications, ces caractéristiques techniques ne sont pas rédhibitoires, d'autant plus que leur fiabilité a été éprouvée dans de nombreux milieux. Ces appareils bénéficient, de plus, du lien automatique avec un logiciel de traitement des séries chronologiques développé au BRGM : « TEMPO ».

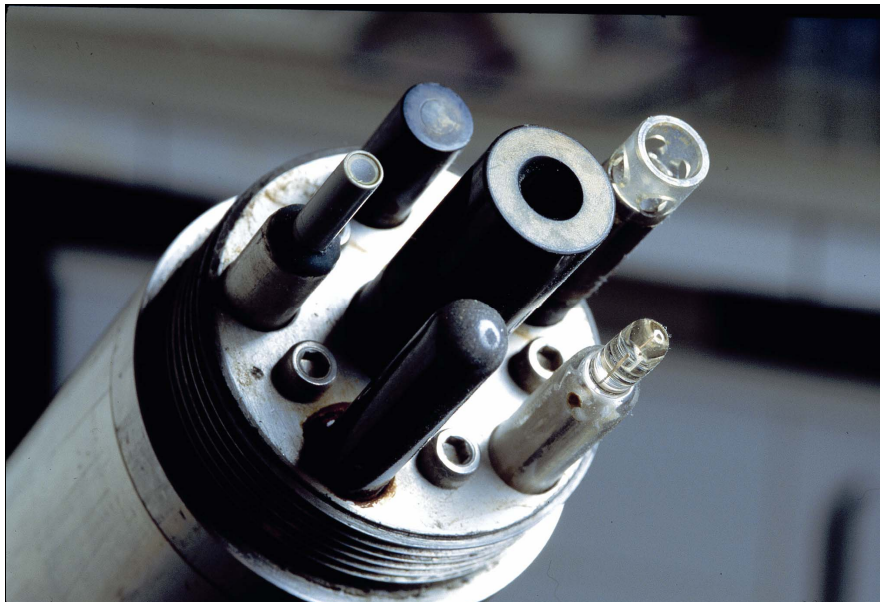


Illustration 10 - Sonde multiparamètre BRGM – vue des capteurs.

Les sondes multiparamètres utilisées dans le cadre de ce projet sont équipées d'une électrode pH (Mettler), nitrate (Mettler), chlorure (Mettler), d'une de référence de type solide (Refex) et d'un capteur de conductivité avec température intégrée (WTW).

Le choix de l'électrode de référence est primordial, car il conditionne la stabilité sur le long terme des mesures effectuées en ce qui concerne le pH et les électrodes sélectives. Les électrodes de référence de type solide, fabriquées par REFEX, ont été retenues en raison de leur insensibilité exceptionnelle à l'encrassement. En effet, l'originalité du système réside dans le fait que l'électrolyte (KCl) est immobilisé dans un polymère dur et non poreux (50 % KCl - 50 % ester de vinyle), et que cette jonction solide possède une grande surface. L'évaluation scientifique de ce produit (Diamond *et al.*, 1994) a montré que l'électrode de référence REFEX est au moins aussi fiable qu'une électrode conventionnelle, bien que son principe de fonctionnement exact ne soit pas encore élucidé. L'utilisation de ces électrodes a permis d'allonger la période de fonctionnement des sondes BRGM sans maintenance dans une eau souterraine.

Les paramètres comme le pH, la température et la conductivité ont été étalonnés en laboratoire. Des solutions tampons à pH = 4,00, 7,00, et 9,21 ont été utilisées, en tenant compte de la correction de température pour étalonner l'électrode pH. La constante de la cellule de conductivité a été déterminée en utilisant une solution à 445 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (25 °C). Enfin, la température a été étalonnée entre 4 et 35 °C à l'aide d'un thermomètre de référence.

Des études antérieures (Guigues *et al.*, 2002) ont montré que les paramètres influençant particulièrement la mesure des nitrates et des chlorures dans une moindre mesure par électrode sélective sont la température, la force ionique, la présence de matière organique et de matières en suspension. Ainsi, l'étalonnage des électrodes sélectives nitrates est réalisé par ajouts dosés sur un échantillon réel, ou de matrice similaire.

2.3. PROCÉDURE DE SUIVI TEMPOREL

Environ toutes les 3-4 semaines, une campagne de mesures et de prélèvements est réalisée.

Un prélèvement manuel est effectué en utilisant des préleveurs jetables. Cependant, à partir du 10 mars 2003, un préleveur à gaz a été de préférence utilisé, car contrairement au préleveur jetable qui ne prélève que l'eau en surface, ce système permet de prélever l'eau à une profondeur bien définie.

Le pH, la conductivité (à 25 °C) et la température sont mesurés sur cet échantillon. Du fait du réchauffement ou du refroidissement de l'échantillon lors du prélèvement en fonction de la température extérieure, la température mesurée n'est pas représentative de la température *in situ*. Les concentrations en nitrates et nitrites sont déterminées dans l'échantillon brut par colorimétrie (kit Merck).

Afin de contrôler l'étalonnage des électrodes sélectives nitrates et chlorures des sondes multiparamètres, des ajouts dosés sont effectués sur l'échantillon prélevé

manuellement (3 ajouts de KCl 0.1 M ou KNO₃ 0.05 M respectivement). Par ailleurs, les données des sondes multiparamètres sont relevées et les sondes sont réinitialisées.

Les échantillons prélevés quotidiennement au moyen du préleveur automatique (SIGMA) sont récupérés et filtrés à 0,45 µm, pour être analysés au laboratoire par chromatographie ionique.

3. Caractérisation du milieu et représentativité des mesures

L'hétérogénéité du milieu, qu'elle soit spatiale et/ou temporelle, a déjà été mise en évidence dans le précédent rapport sur certains puits (notamment celui des Glandons). Ces hétérogénéités chimiques inter puits mais également intrapuits, pose deux problèmes majeurs :

- la représentativité du prélèvement d'une eau souterraine réalisée en vue d'un suivi de la qualité des eaux sur un site naturel ;
- la représentativité des mesures faites, *in situ*, lors de la mise en place d'un réseau de mesures en continu (positionnement des capteurs dans la partie active du puits, c'est-à-dire dans la zone de circulation de la nappe).

Une campagne de caractérisation (diagraphie) et de prélèvement (à différentes profondeurs) pour la détermination de la composition chimique et des teneurs en phytosanitaires a été réalisée en basses eaux (novembre-décembre 2003), afin de confirmer l'hétérogénéité des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines déjà observées (études antérieures, Baran et précédent rapport). Ainsi, 8 puits (la Bissaugerie, les Glandons, les Grands Pressoirs, la Tournerie, les Grands Buissons, les Hirlais, les Jobards et les Trois Chapeaux) et la source ont été considérés pour cette étude, répartis entre l'amont et l'aval du bassin (ill. 2).

3.1. VARIABILITÉ SPATIALE DE LA QUALITÉ DES EAUX

La variabilité spatiale de la composition chimique des eaux souterraines a été étudiée à deux échelles : celle du bassin karstique et celle du puits en fonction de la profondeur.

3.1.1. À l'échelle du bassin

Les données de composition chimique et de polluants phytosanitaires sont reportées en annexe 1.

a) *Composition chimique et nitrates*

Les concentrations en nitrates à l'échelle du bassin sont comprises entre 10 mg/l et 90 mg/l. De même, la conductivité varie entre 300 et 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (à 25 °C). Il existe par ailleurs une tendance générale à l'enrichissement des teneurs en nitrates (et de sels) dans les eaux souterraines, de l'amont vers l'aval du bassin versant (ill. 11) avec cependant des apports localisés parfois importants (cas des Grands Buissons dans la partie amont du bassin et des Grands Pressoirs en aval par exemple), selon le type d'utilisation des sols ou de la couverture végétale (agriculture, forêts, etc.). Ces résultats confirment les hétérogénéités de composition chimique des eaux souterraines

du bassin des Trois Fontaines, déjà partiellement observées lors des études réalisées antérieurement (Lasne, 1992 ; Baran, 1996).

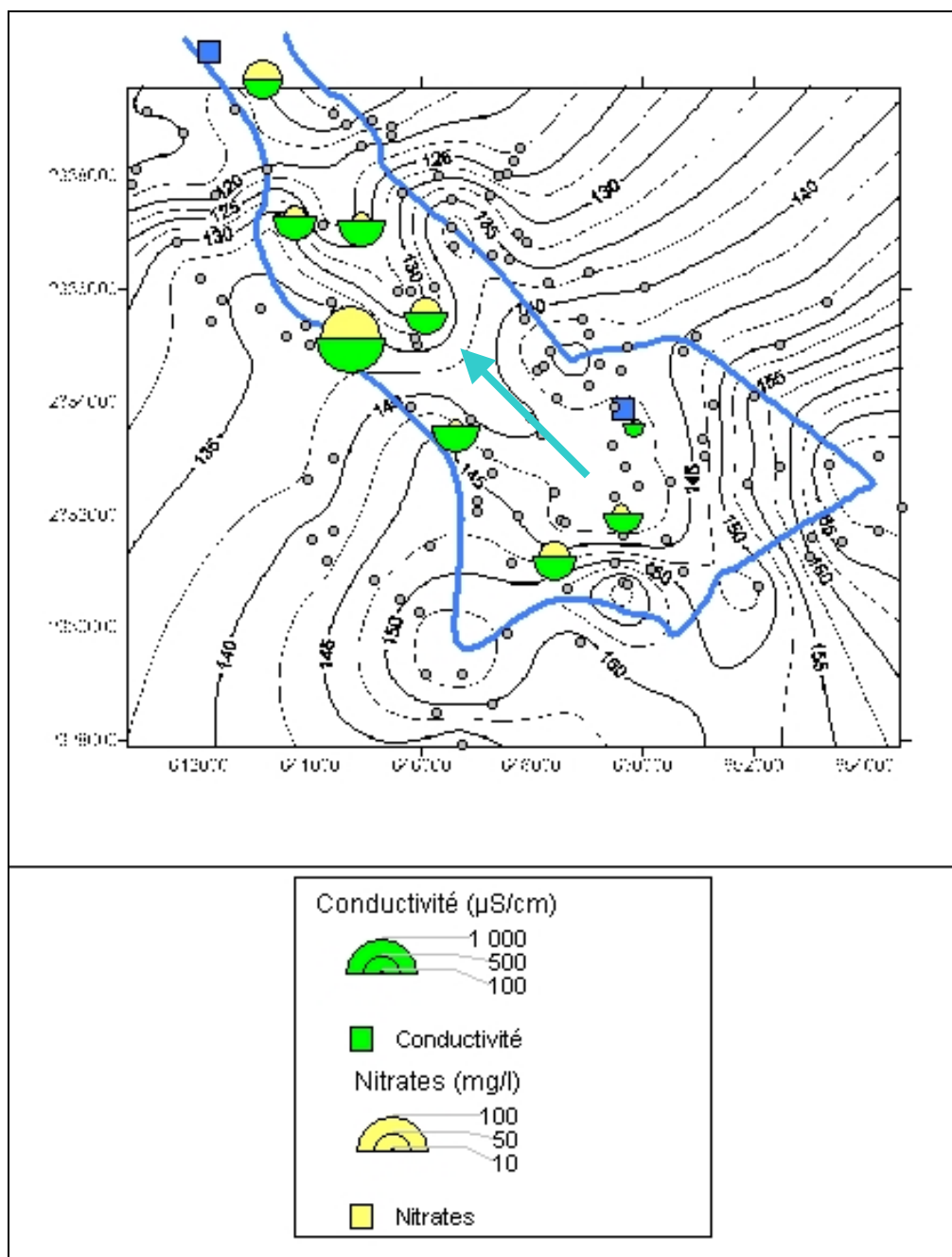


Illustration 11 - Carte de la conductivité et des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003).

Les diagrammes ternaires des anions et cations montrent que la composition chimique des eaux est variable à l'échelle du bassin. Ainsi le puits de la Tournerie, et dans une moindre mesure celui des Jobards et des Glandons, est caractérisé par une proportion importante de potassium et de sodium par rapport à une dominante calcium (60 - 85 %) pour les autres puits (ill. 12). De même les anions majoritaires sont les bicarbonates (70 - 85 %), avec cependant une proportion plus importante en chlorures et nitrates pour les puits des Grands Pressoirs, des Glandons et des Hirlais (ill. 13). Enfin, une bonne corrélation existe entre la teneur en calcium et la conductivité (ill. 14) d'une part et la teneur en bicarbonates d'autre part (ill. 15) montrant la prédominance du calcium et des bicarbonates dans les eaux du bassin.

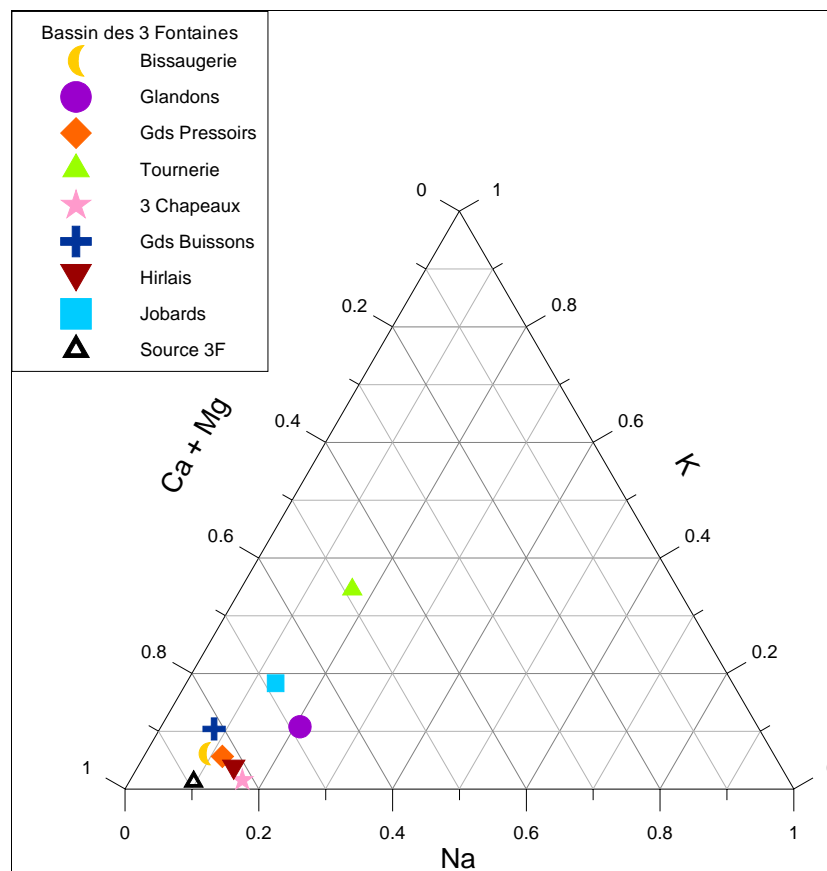


Illustration 12 - Composition relative en cations des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003). Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l, afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.

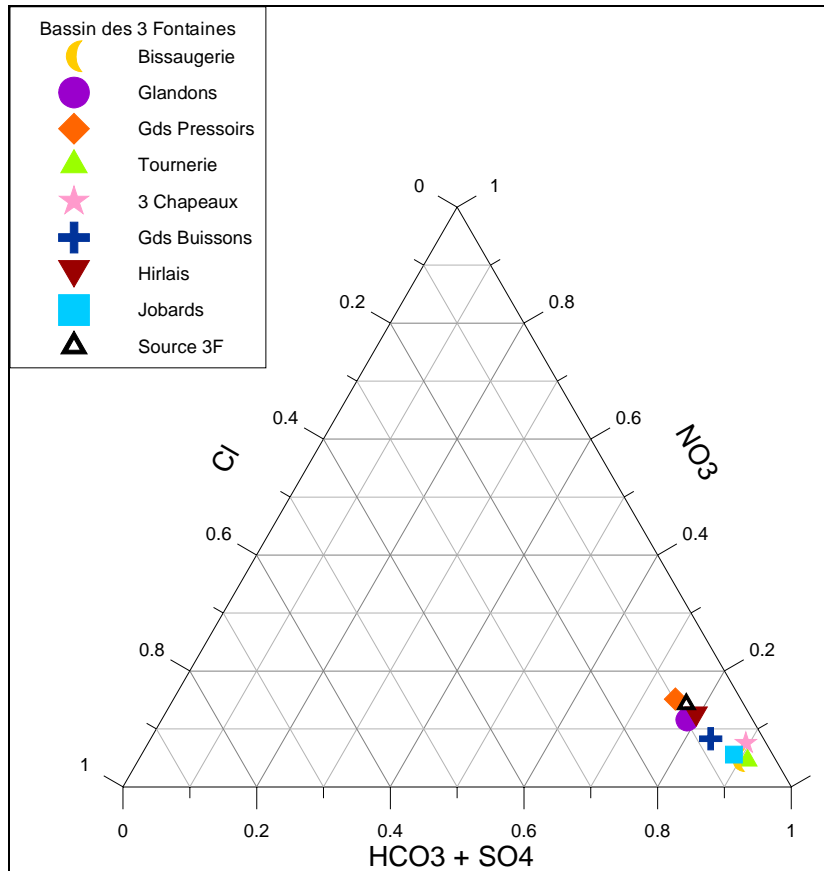


Illustration 13 - Composition relative en anions des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003). Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l, afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.

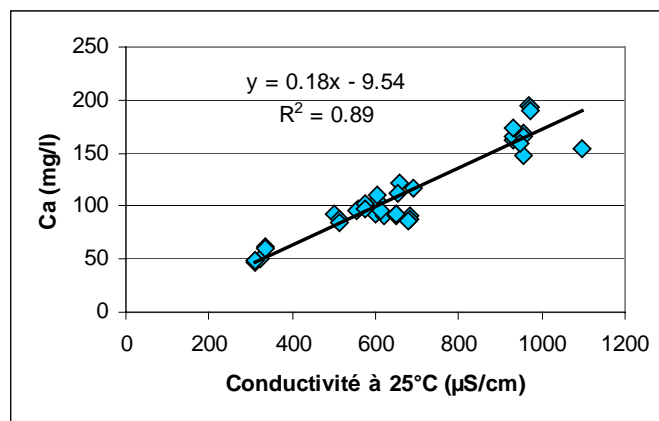


Illustration 14 - Relation entre la teneur en calcium et la conductivité dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (n = 39).

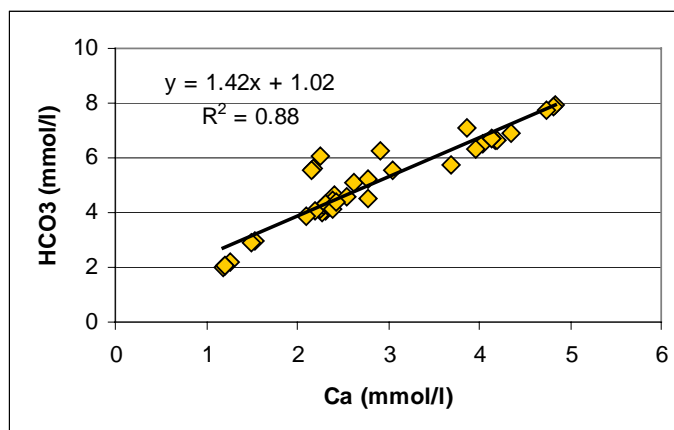


Illustration 15 - Relation entre la teneur en calcium et la teneur en bicarbonates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines ($n = 39$).

b) Phytosanitaires

L'hétérogénéité des teneurs en pesticides sur le bassin, quoique différente de celle des nitrates, est cependant très marquée (ill. 16). En effet, les teneurs en atrazine varient entre 0,01 et 0,7 $\mu\text{g/l}$ (puits des Jobards et des Trois Chapeaux). Pour mémoire, la limite réglementaire pour une eau de consommation est de 0,1 $\mu\text{g/l}$ pour chaque composé, et 0,5 $\mu\text{g/l}$ pour la somme des composés. Par ailleurs, la proportion relative de l'atrazine et de ces dérivées, la déséthylatrazine (DEA) et la désisopropylatrazine (DIA), est différente d'un puits à l'autre, comme ceci peut se voir sur la carte mais aussi sur le diagramme ternaire de l'illustration 17. Enfin, les puits de la Tournerie et de la Bissaugerie sont caractérisés par des teneurs en pesticides très faibles (voire non détectables).

La dégradation de l'atrazine en DEA et DIA est plus ou moins importante selon les puits. Ainsi, pour le puits des Hirlais, la proportion d'atrazine représente 40 % de la quantité de pesticides, alors que pour les autres puits, le pourcentage d'atrazine est compris entre 10 et 25 %. De même pour des puits relativement proches géographiquement, comme les Jobards et les Trois Chapeaux, la proportion relative de DEA et DIA est très différente, avec pour la DEA respectivement 36 et 74 % pour les deux puits. En fait pour une même proportion d'atrazine (20 %), les puits des Jobards, des Glandons, des Grands Pressoirs et des Trois Chapeaux sont de plus en plus riches en DEA par rapport à la DIA.

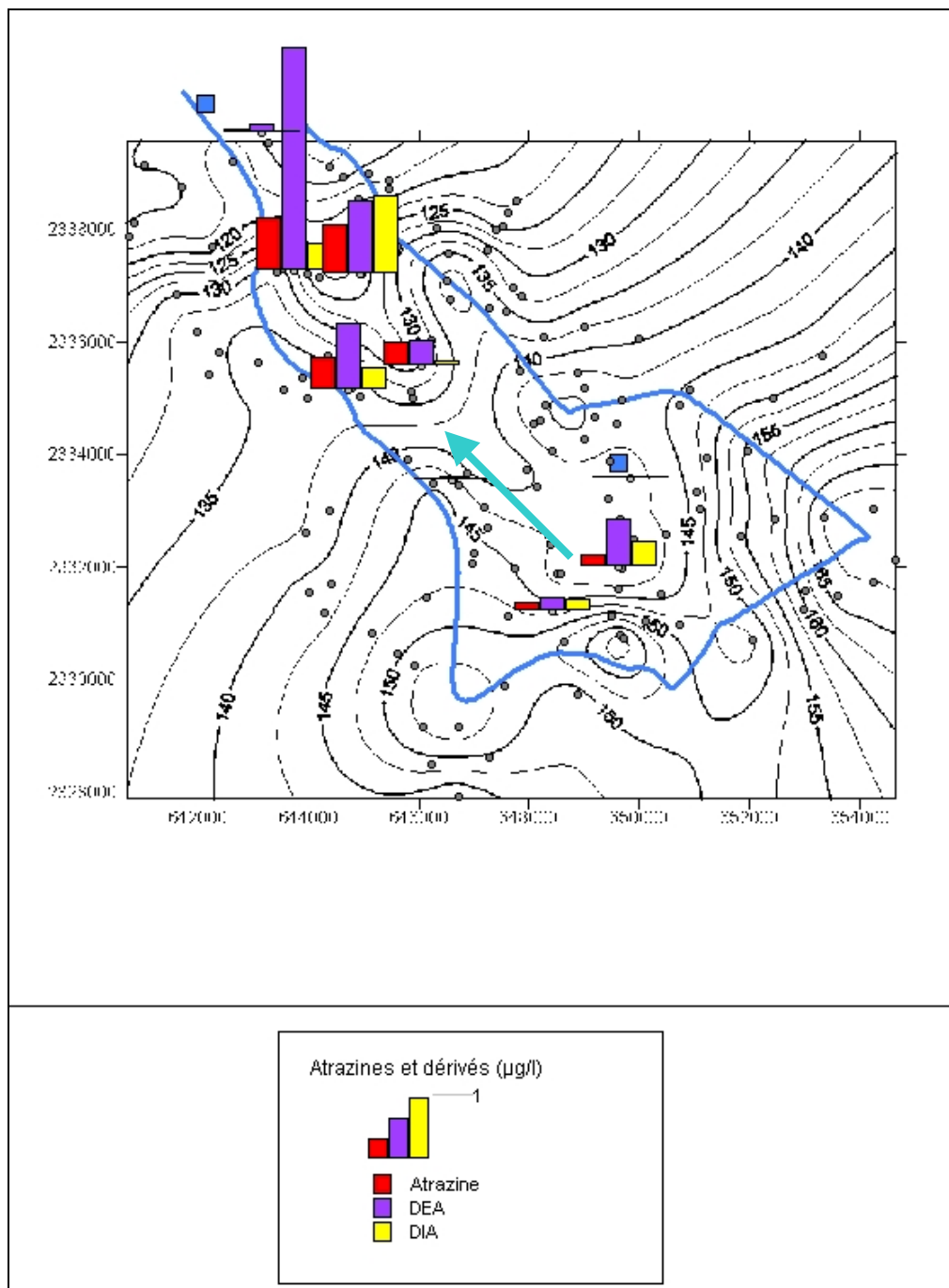


Illustration 16 - Carte des teneurs relative en atrazine, déséthylatrazine (DEA) et désisopropylatrazine (DIA) dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003).

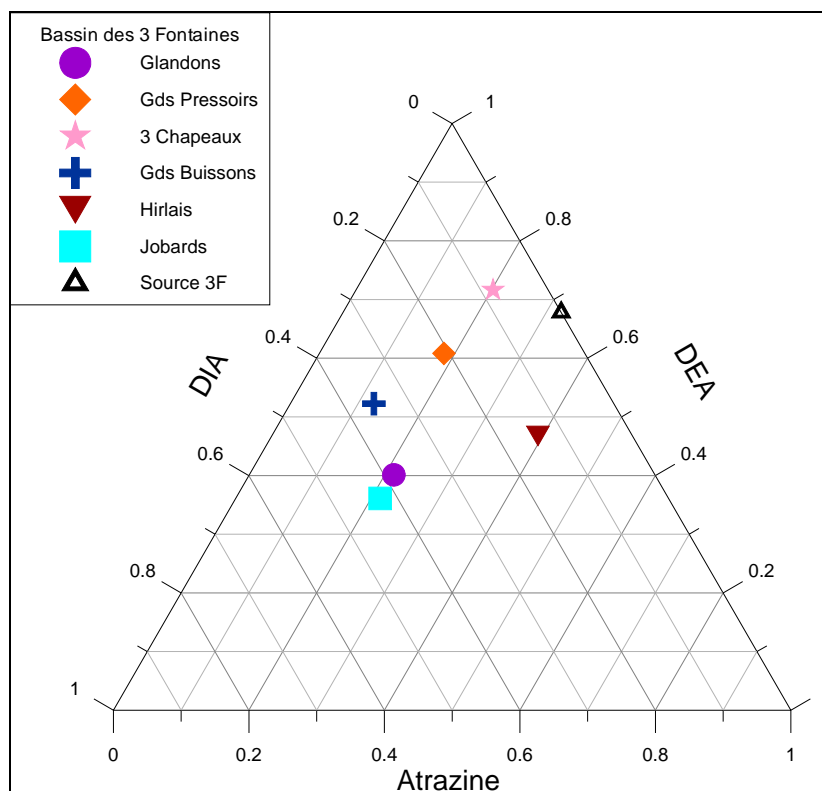


Illustration 17 - Concentrations relatives en pesticides dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003). Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.

3.1.2. À l'échelle d'un puits

a) Paramètres physico-chimiques

Les diagraphies obtenues lors de la campagne de novembre – décembre 2003 permettent de classer les puits selon le degré d'hétérogénéité en fonction de la profondeur. Ainsi, les puits des Trois Chapeaux (ill. 18) et des Jobards (ill. 19) sont caractérisés par une hétérogénéité très prononcée. En effet, la conductivité en surface de l'ordre de 650-700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ passe à 950-1 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en fond de puits, soit un écart de conductivité de 300-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette hétérogénéité, bien qu'existante est beaucoup moins marquée pour les puits des Hirlais (ill. 20), des Grands Pressoirs (ill. 21) et des Grands Buissons (ill. 22), l'écart de conductivité étant de l'ordre de 20-50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Par contre, les puits de la Tournerie (ill. 23), de la Bissaugerie (ill. 24) et des Glandons (ill. 25) ne présentent pas d'hétérogénéité. Par ailleurs, la comparaison des diagraphies obtenues durant la campagne de novembre-décembre 2003 avec celle réalisée en avril 2003 permet de mettre en évidence des comportements différents selon le cycle hydrologique sur le puits des Glandons (voir Guigues *et al.* 2003).

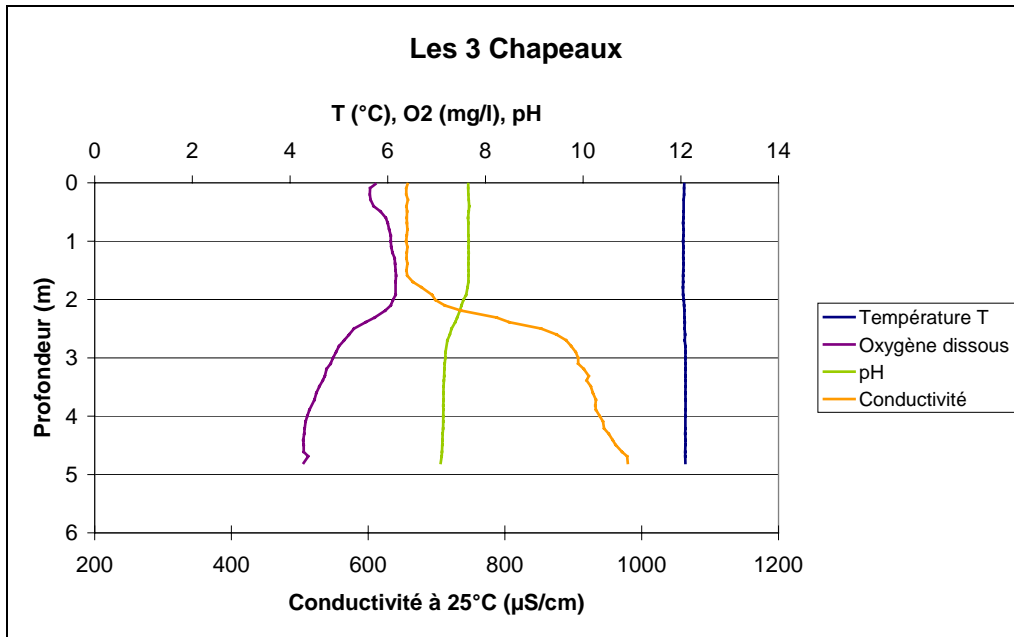


Illustration 18 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Trois Chapeaux.

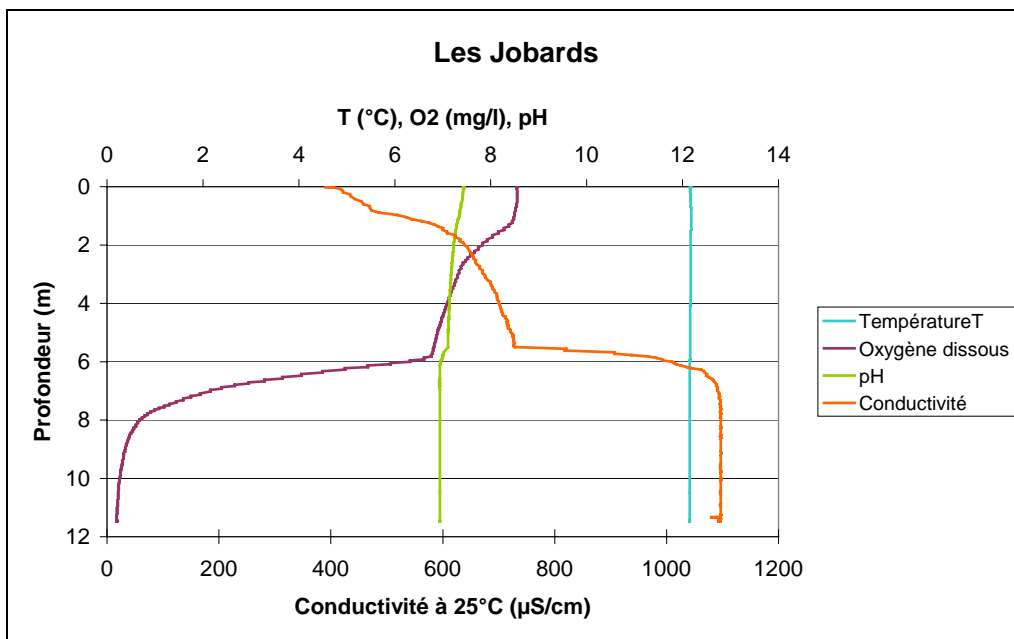


Illustration 19 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Jobards.

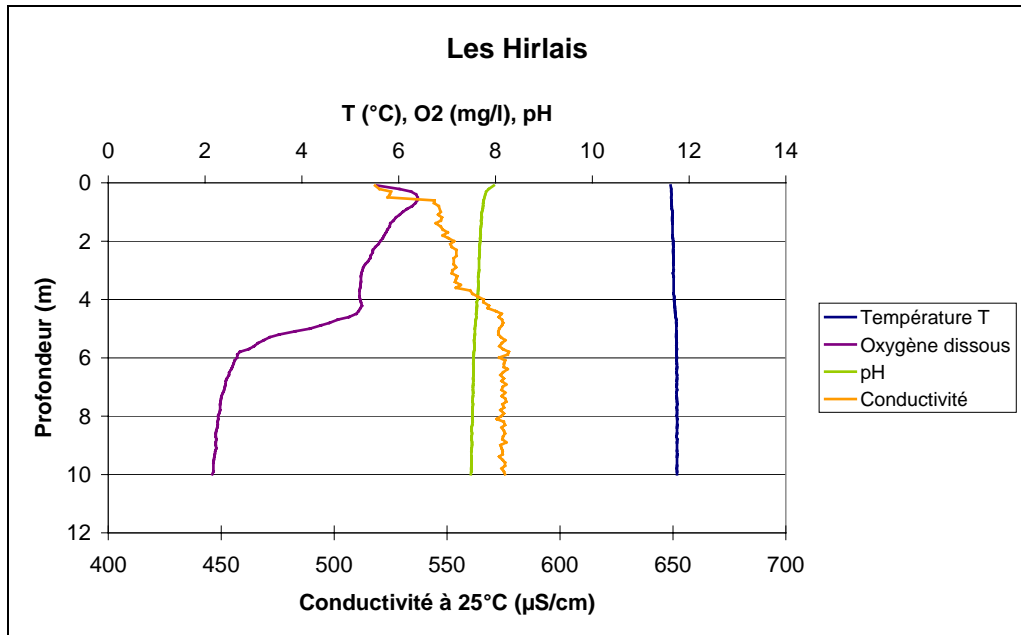


Illustration 20 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Hirlais.

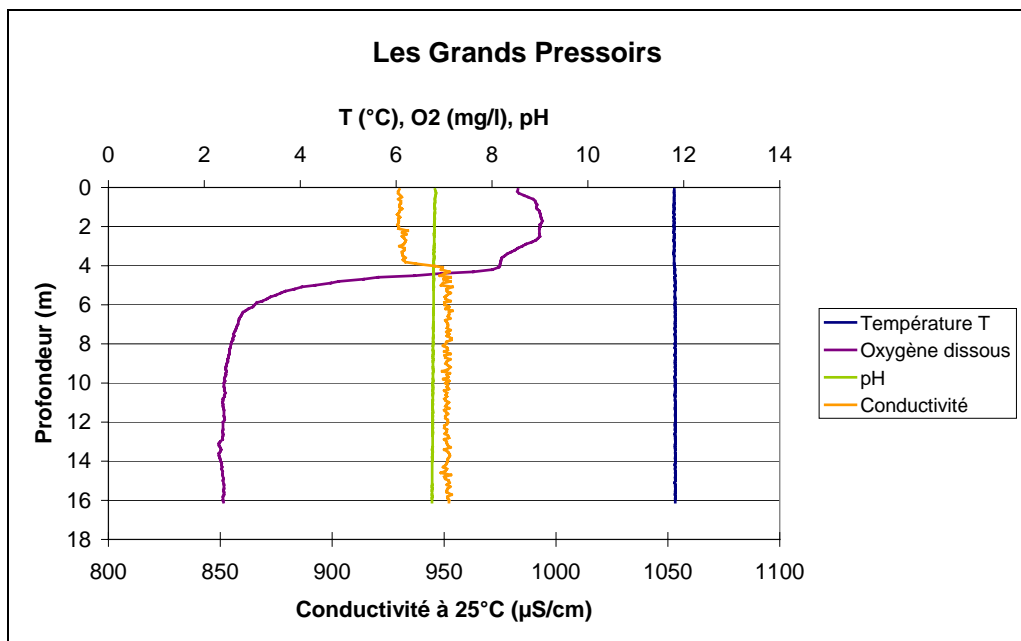


Illustration 21 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Grands Pressoirs.

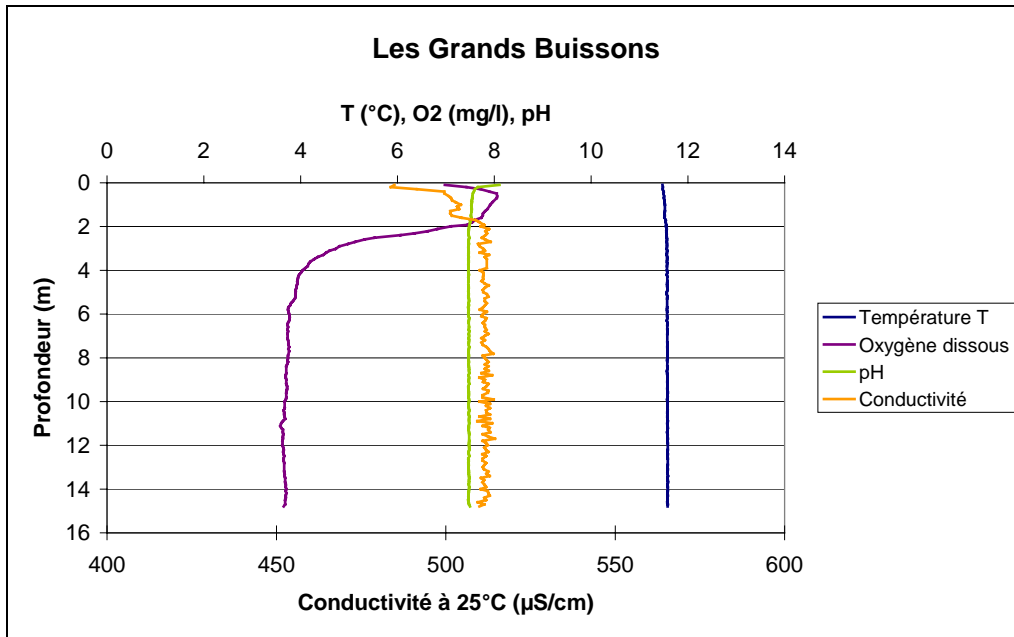


Illustration 22 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Grands Buissons.

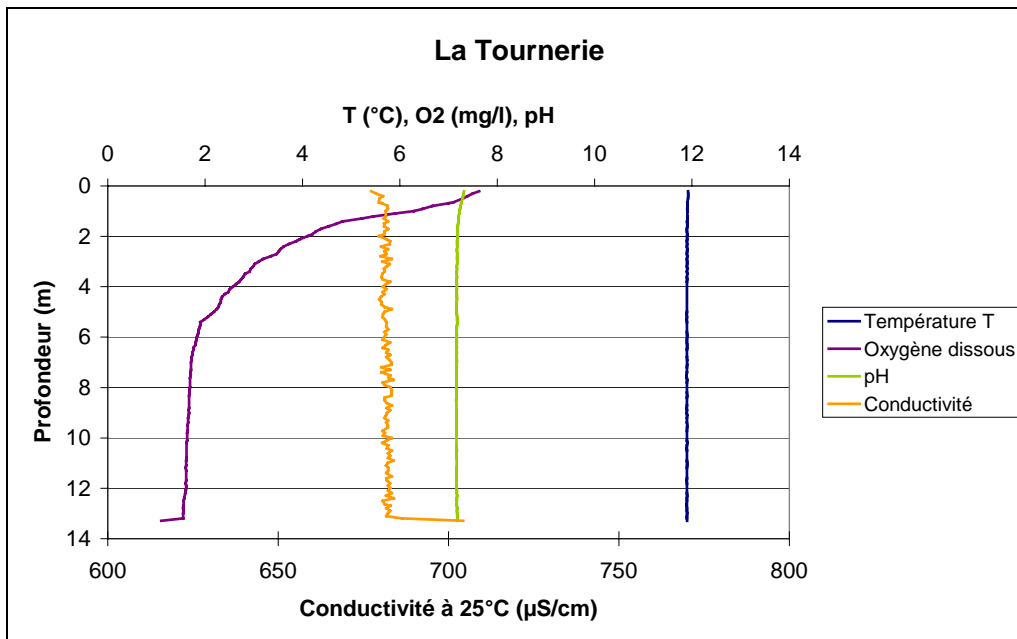


Illustration 23 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits de la Tournerie.

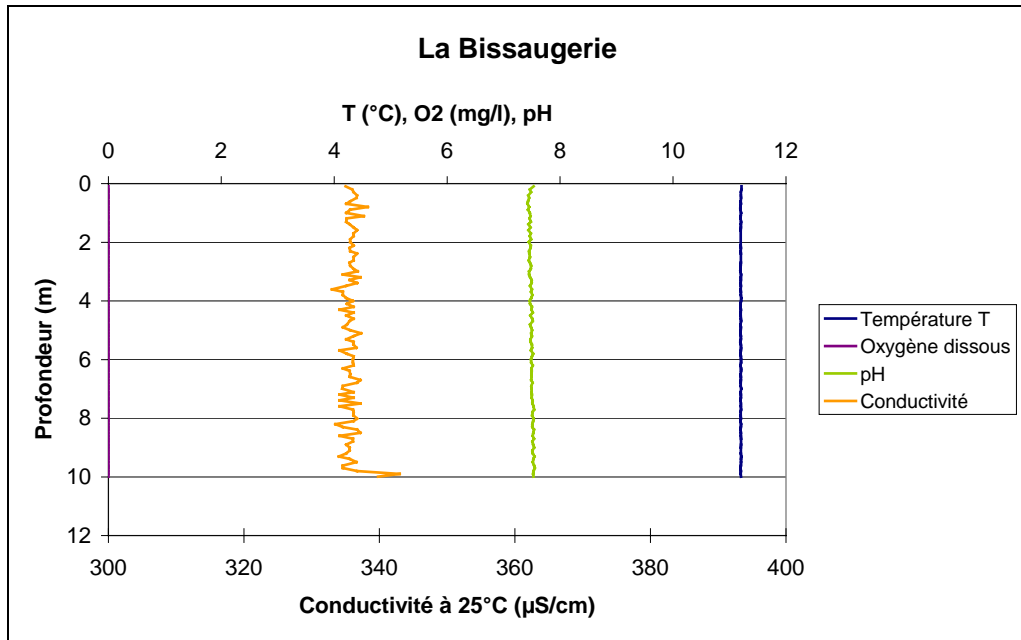


Illustration 24 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits de la Bissaugerie.

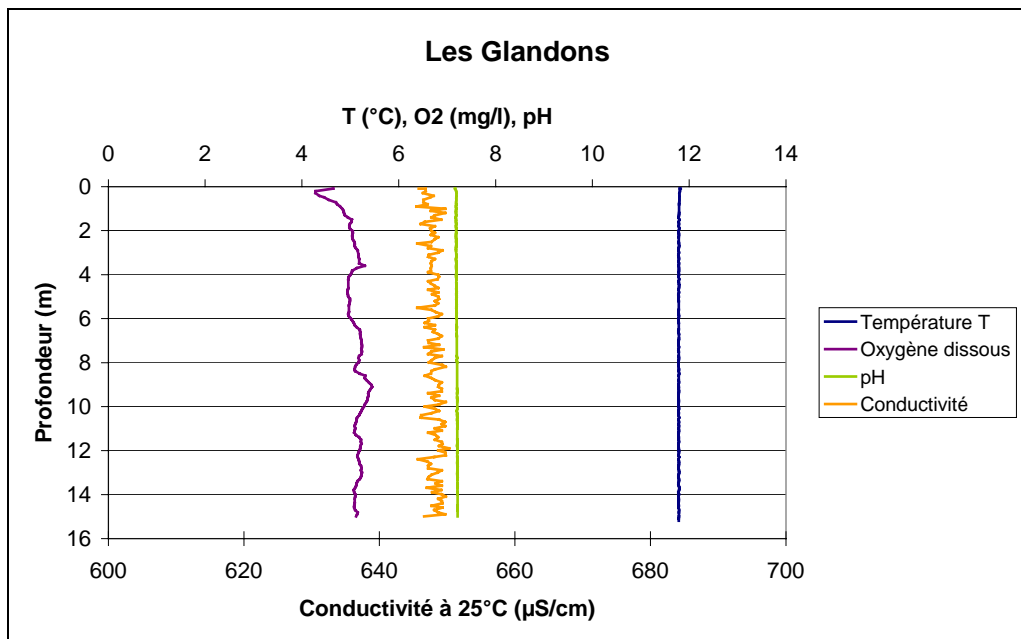


Illustration 25 - Diagraphie des paramètres physico-chimiques (novembre-décembre 2003) – Puits des Glandons.

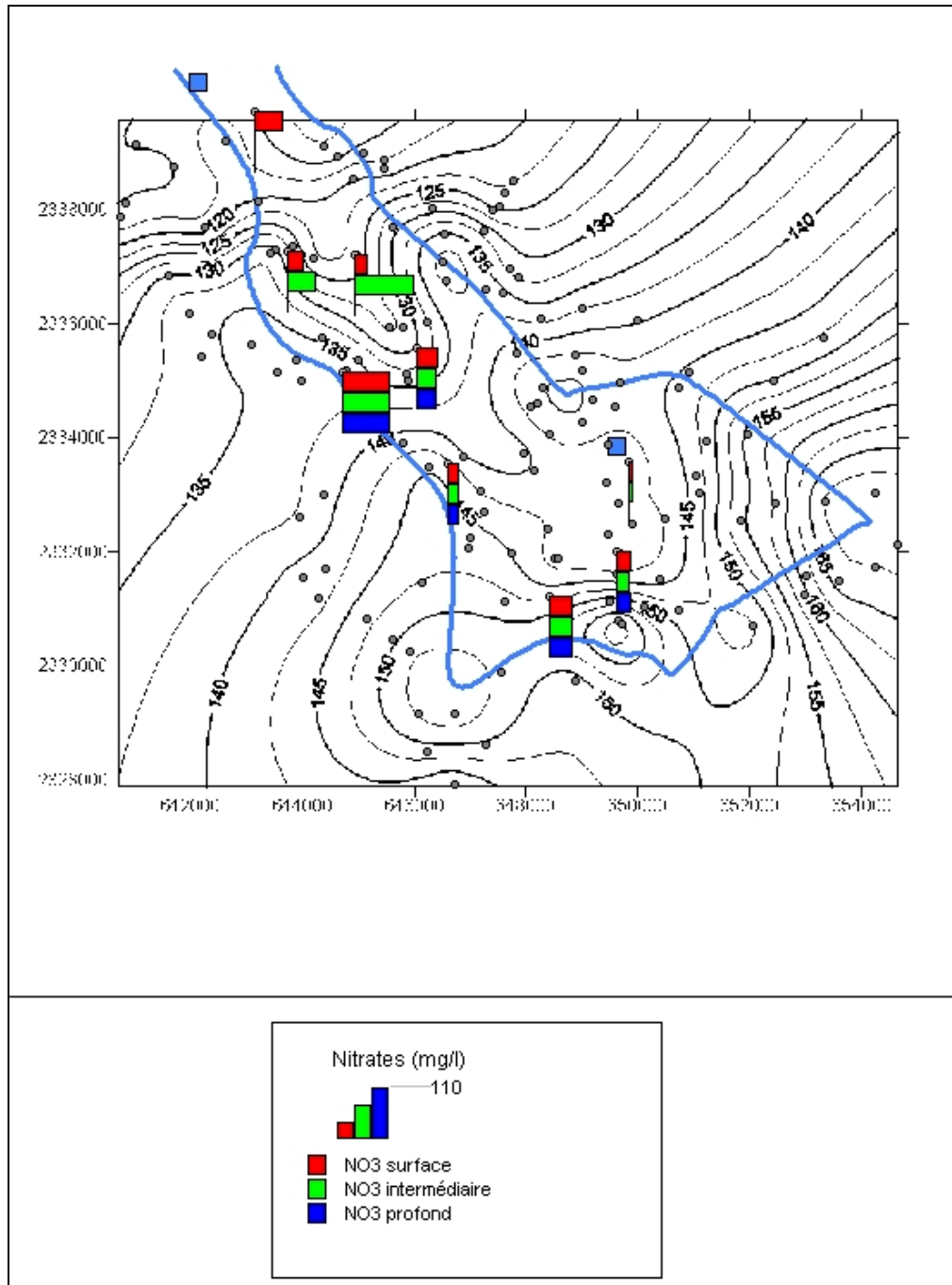


Illustration 26 - Carte des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003), prélevées à trois profondeurs.

b) Nitrates

Une hétérogénéité des teneurs en nitrates en fonction de la profondeur existe pour les deux puits présentant une forte hétérogénéité de la conductivité, c'est-à-dire les puits les plus en aval, les Jobards et les Trois Chapeaux (ill. 26).

D'une manière générale, il existe une bonne relation entre les profils de conductivité et les teneurs en nitrates en fonction de la profondeur pour l'ensemble des puits étudiés (ill. 28 et 29). Des résultats similaires avaient déjà été observés lors de la campagne de prélèvement effectuée en hautes eaux en avril 2003 sur les puits de la Bissaugerie, des Glandons et des Grands Pressoirs. Ainsi, la conductivité peut être considérée comme un paramètre indicatif de la teneur en nitrates sur le bassin des Trois Fontaines (ill. 27). Cependant, pour certains puits, l'augmentation ou la diminution de la conductivité reflète aussi celles en d'autres éléments. Ainsi, les teneurs en potassium, calcium et chlorures du puits des Jobards augmentent avec la profondeur. Dans le cas du puits des Trois Chapeaux, ce sont les chlorures, le calcium et le sodium qui augmentent avec la profondeur. Dans les deux cas, les sulfates diminuent légèrement avec la profondeur. À l'inverse, les teneurs des cations et anions des puits des Glandons, de la Bissaugerie et des Grands Buissons sont constantes avec la profondeur. En ce qui concerne les puits des Hirlais et des Grands Pressoirs, bien que les teneurs en nitrates diminuent de la surface vers la zone intermédiaire, les teneurs en sodium et sulfates augmentent légèrement et les teneurs en calcium sont fluctuantes. Par ailleurs pour le puits des Grands Pressoirs, une augmentation des teneurs en chlorures et en potassium non négligeable peut expliquer l'augmentation de la conductivité de l'ordre de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

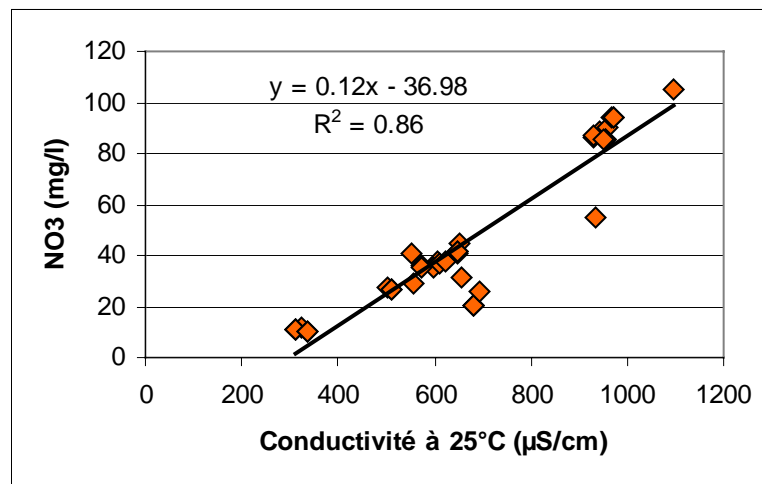


Illustration 27 - Relation entre la conductivité et la teneur en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines – tous puits confondus.

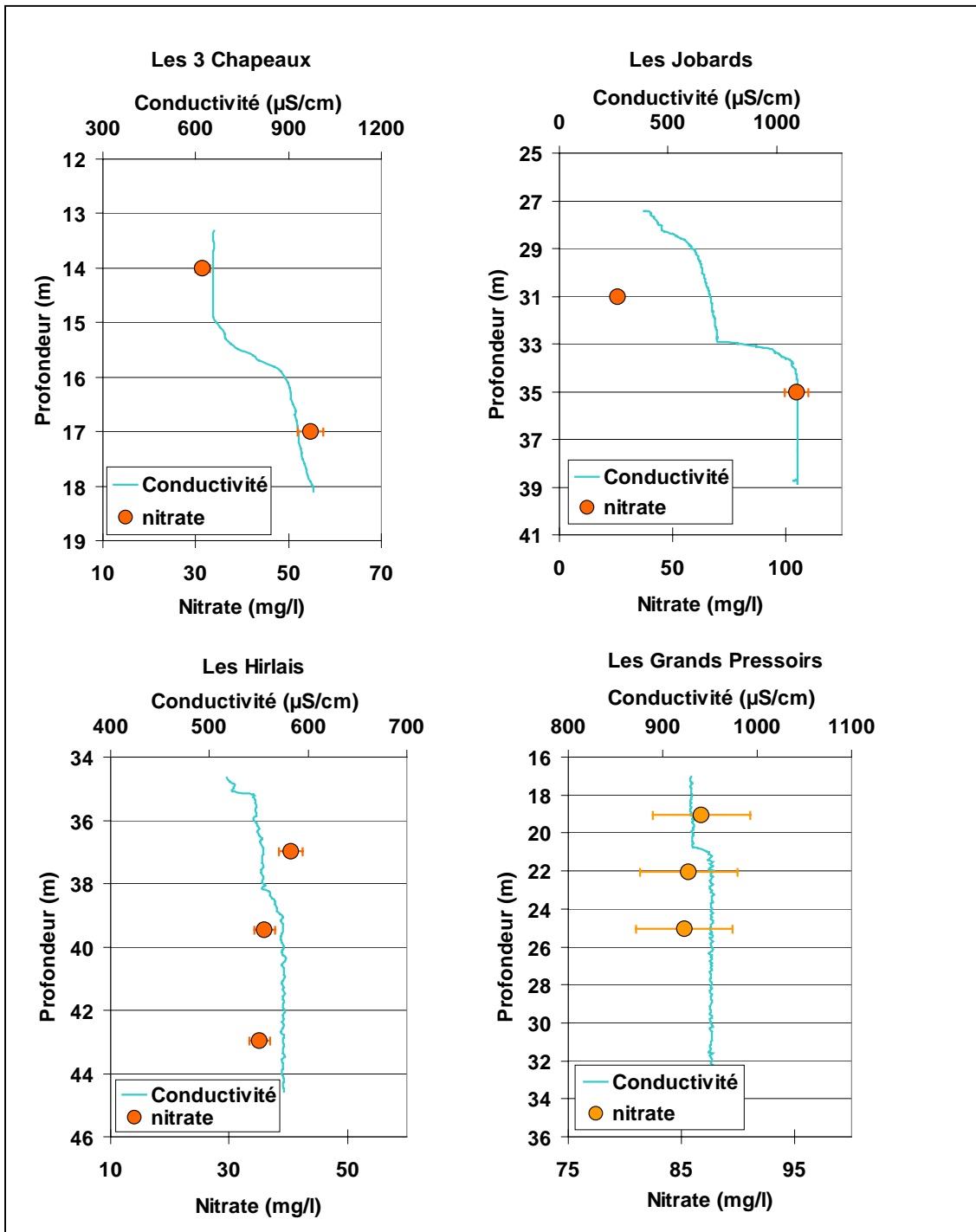


Illustration 28 - Profil conductivité et concentration en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (1).

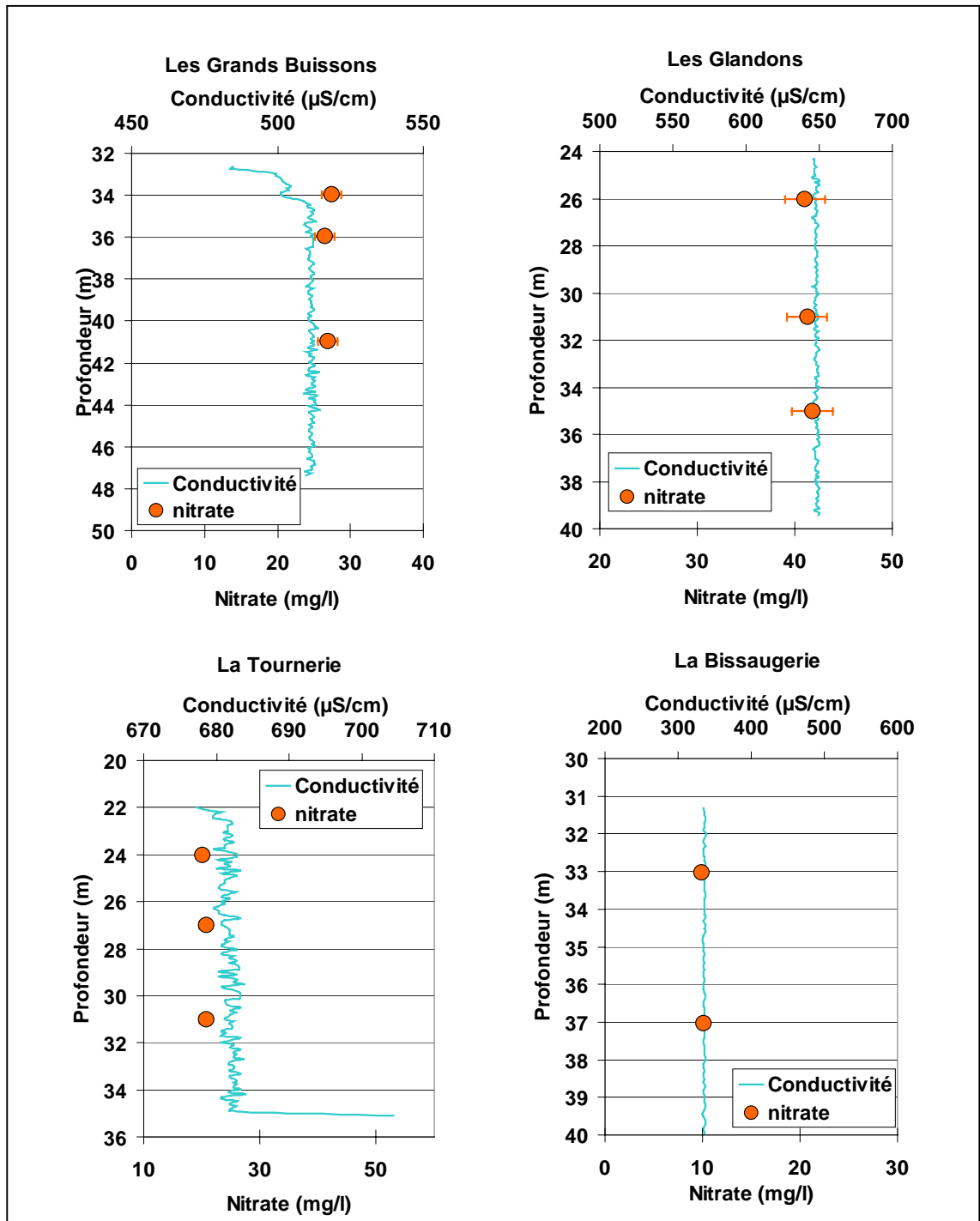


Illustration 29 - Profil conductivité et concentration en nitrates dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (2).

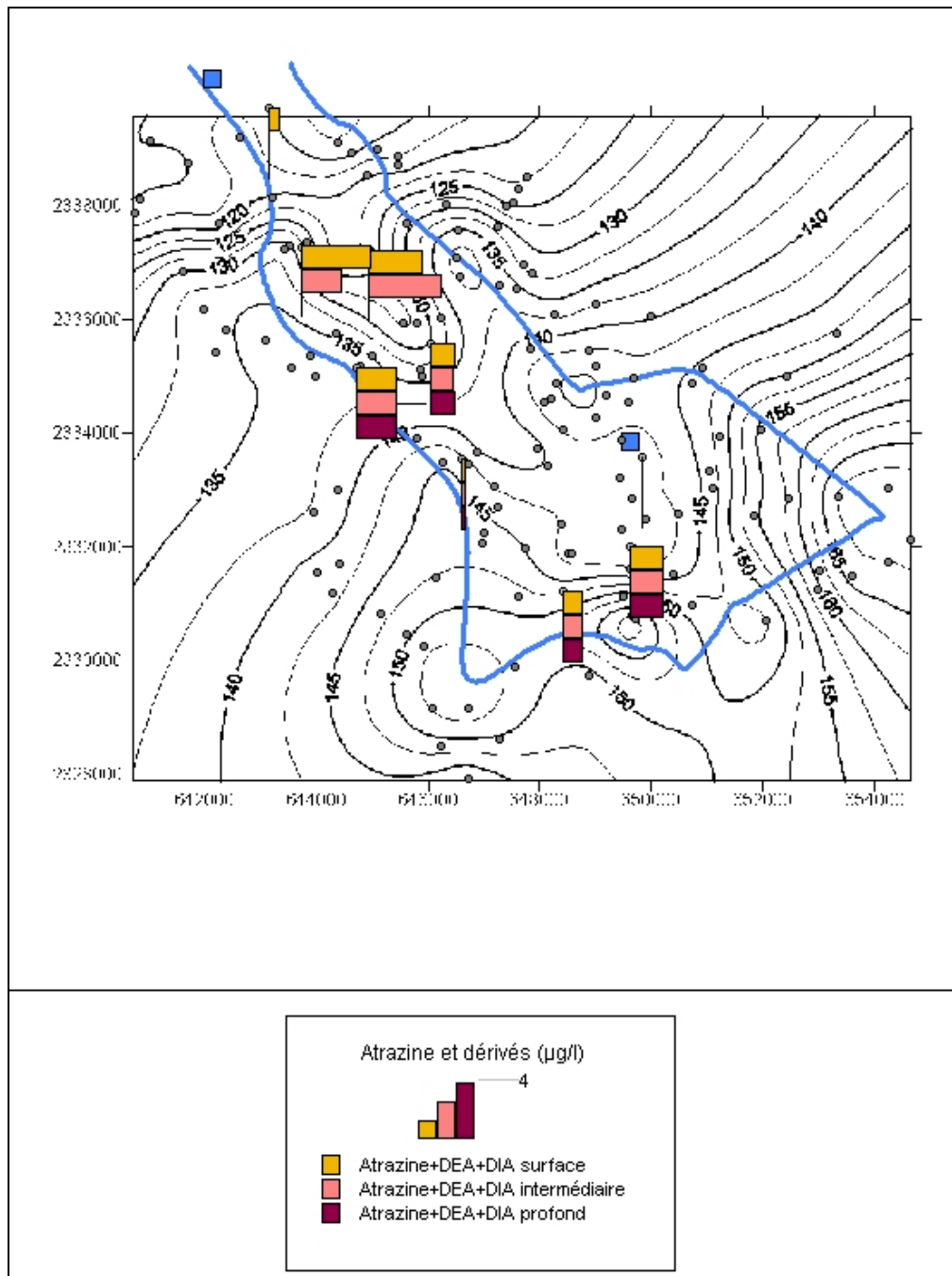


Illustration 30 - Cartes des teneurs en pesticides (atrazine + DEA + DIA) dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (novembre-décembre 2003), prélevées à trois profondeurs.

c) Phytosanitaires

Des variations importantes des teneurs en pesticides en fonctions de la profondeur peuvent être observées, comme pour les puits des Jobards et des Trois Chapeaux (ill. 30).

À l'inverse des nitrates, il n'existe pas de relation entre la teneur en pesticides et la conductivité (ill. 31, 32 et 33). Par ailleurs, les teneurs en atrazine, DEA et DIA en fonction de la profondeur peuvent être croissants (DEA, les Grands Buissons et les Grands Pressoirs) ou décroissants (les Trois Chapeaux) ou stables (les Glandons), indépendamment les uns des autres pour un même puits (les Grands Buissons), ou allant dans le même sens (les Trois Chapeaux).

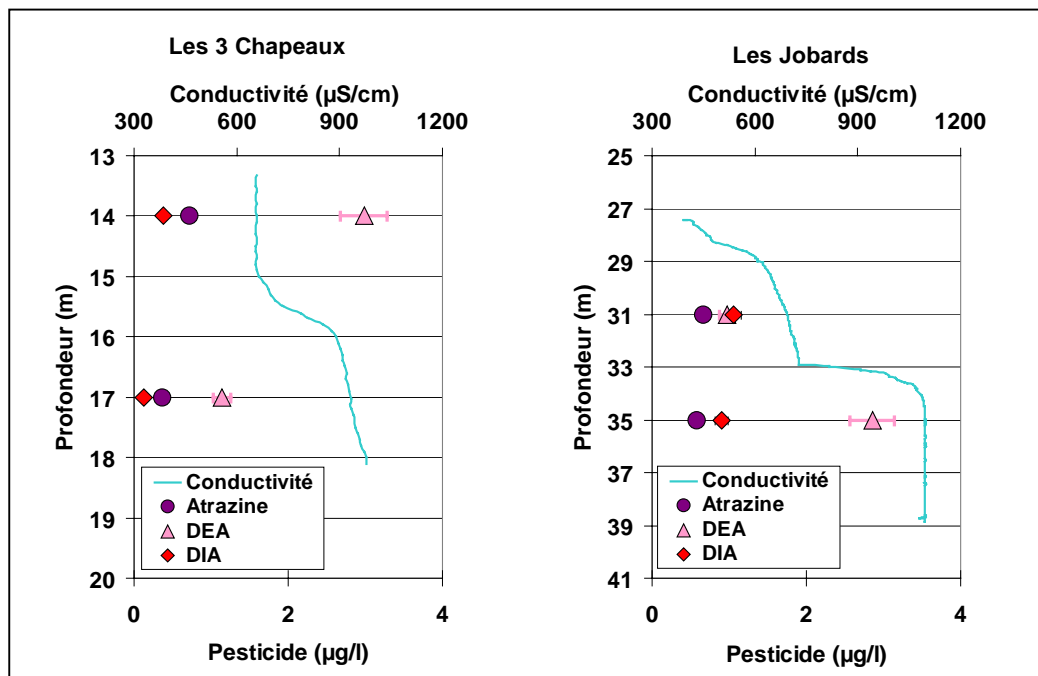


Illustration 31 - Profil conductivité et concentration en pesticides dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (1).

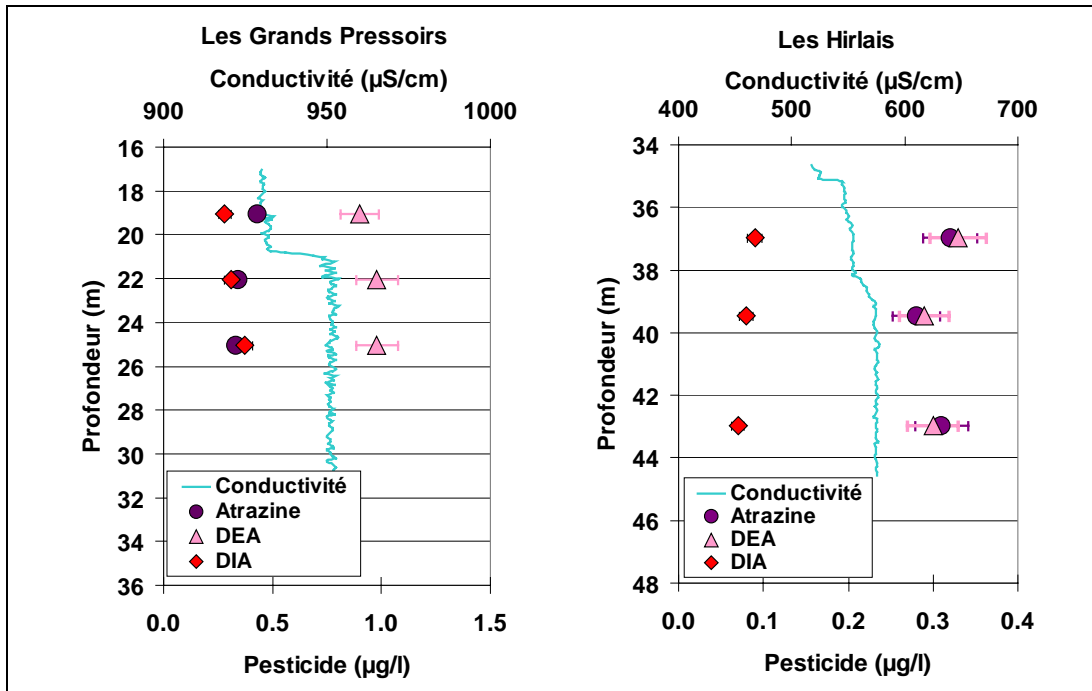


Illustration 32 - Profil conductivité et concentration en pesticides dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (2).

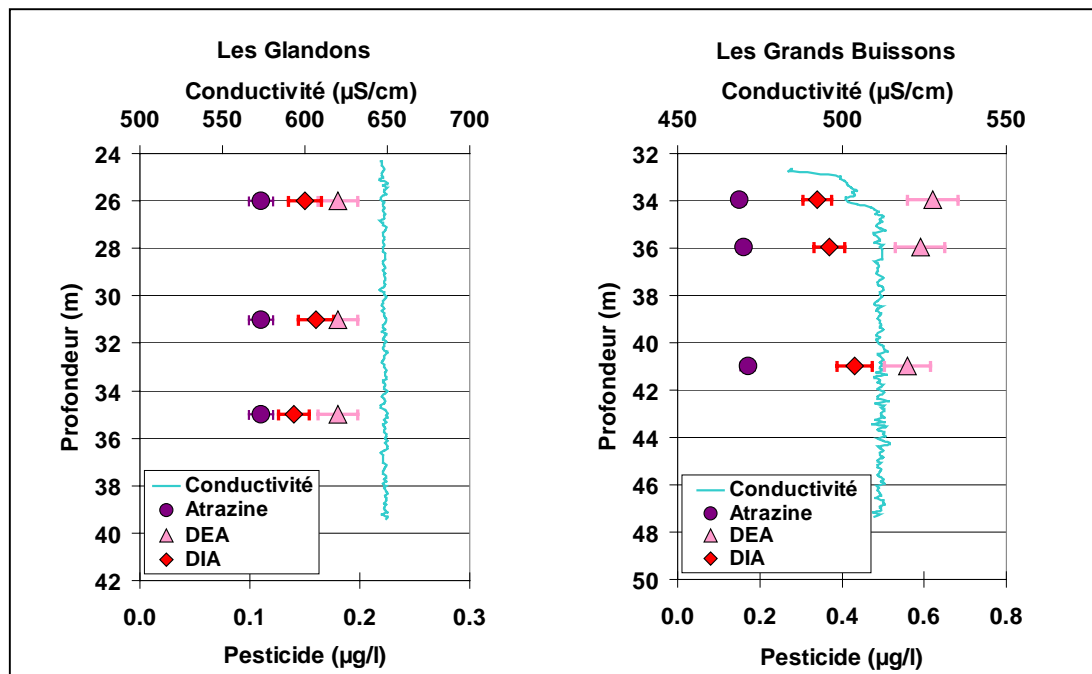


Illustration 33 - Profil conductivité et concentration en pesticides dans les eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines (3).

3.2. VARIABILITÉ TEMPORELLE DE LA QUALITÉ DES EAUX

Une variabilité temporelle de l'hétérogénéité spatiale a été observée à l'échelle du bassin et à l'échelle d'un puits.

3.2.1. À l'échelle du bassin

- **Composition chimique**

Les diagrammes ternaires des cations (ill. 34) et des anions (ill. 35) des échantillons prélevés depuis juillet 2002 pour le puits des Glandons et la Source, et depuis janvier-février 2003 pour les puits de la Bissaugerie et des Grands Pressoirs, montrent qu'il existe une variabilité dans le temps des concentrations relatives plus importante pour le puits des Glandons que pour les autres puits. Par contre, les teneurs relatives en éléments chimiques de la Source sont relativement stables dans le temps sur la période étudiée.

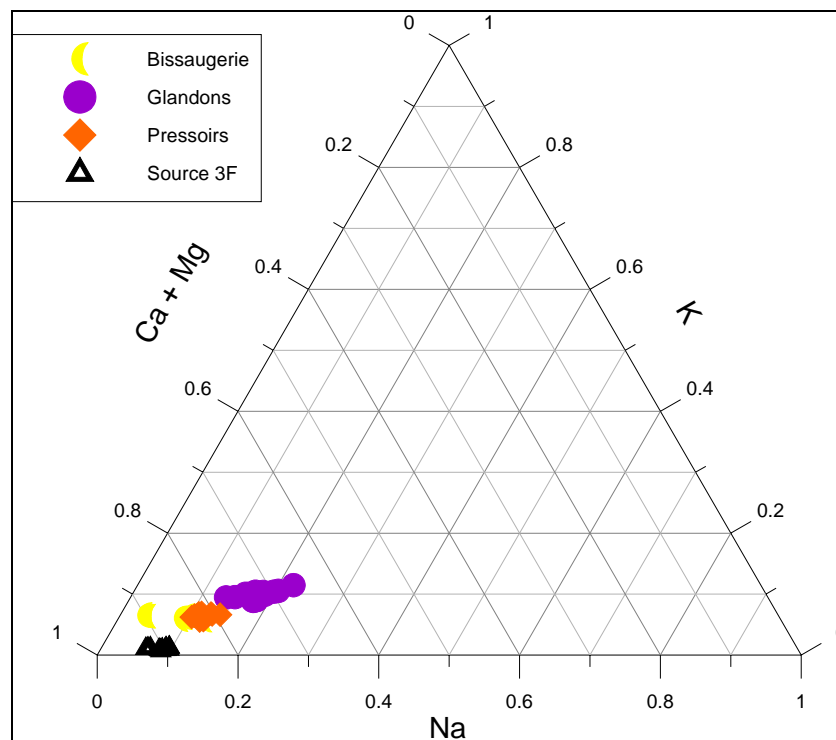


Illustration 34 - Composition relative en cations des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines sur la période juillet 2002-décembre 2003. Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l, afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.

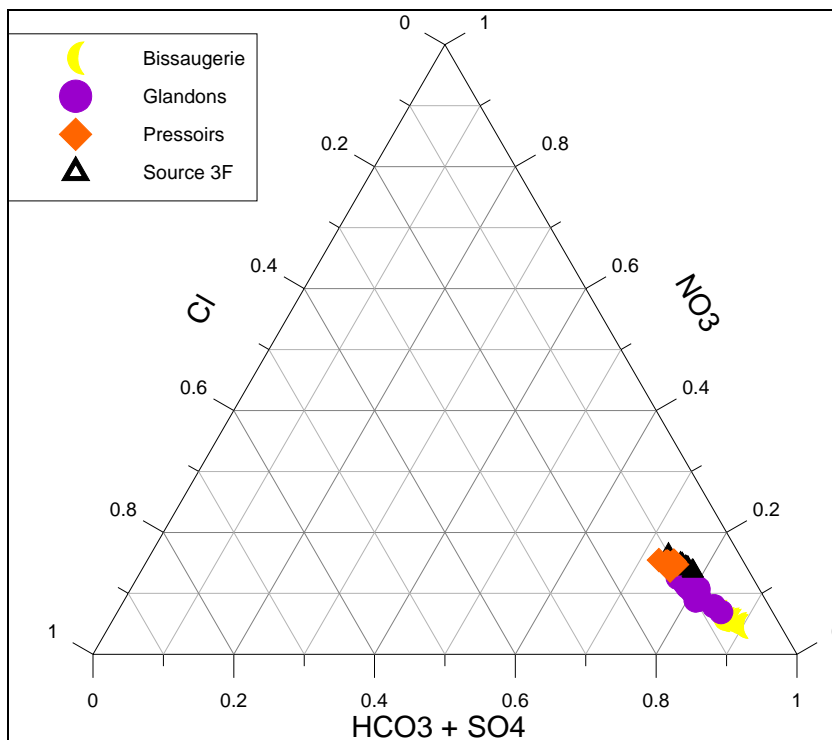


Illustration 35 - Composition relative en anions des eaux souterraines du bassin des Trois Fontaines sur la période juillet 2002-décembre 2003. Le diagramme a été réalisé à partir des données en mol/l, afin de ne pas pondérer chaque composé de sa masse molaire.

3.2.2. À l'échelle d'un puits

L'évolution du niveau piézométrique des eaux souterraines permet de définir la périodes des hautes eaux et des basses eaux sur la période étudiée (ill. 36). Ainsi, le maximum est atteint en février-mars 2003 et le minimum en décembre 2002 et 2003. Il est cependant important de garder en mémoire, que sur les dix dernières années, les niveaux piézométriques sont à leurs maxima depuis 2001. Par ailleurs, l'amplitude de variation du niveau piézométrique est variable selon les puits, avec 3,75 m pour le puits des Glandons, 3 m pour le puits de la Bissaugerie, 2,75 m pour le puits des Grands Pressoirs et 2 m pour le puits des Grands Buissons pour lequel une mesure en continu du niveau piézométrique est effectuée par la DIREN Centre.

La comparaison des diagraphies par paramètres (conductivité, T, pH, O₂) effectuées régulièrement en 2003, sur un cycle hydrologique (hautes eaux et basses eaux), pour les puits de la Bissaugerie (ill. 37), des Glandons (ill. 38) et des Grands Pressoirs (ill. 39), permet de mettre en évidence la variabilité temporelle de l'hétérogénéité ou de l'homogénéité verticale de la colonne d'eau de chaque puits.

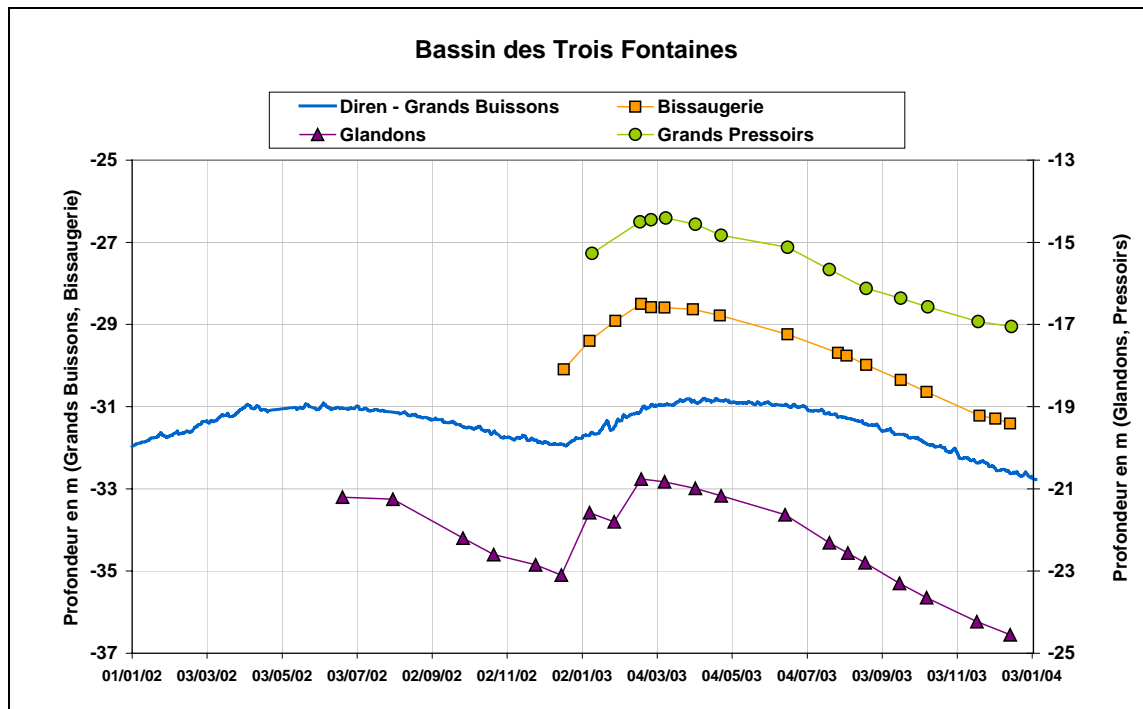


Illustration 36 - Évolution dans le temps du niveau piézométrique sur le bassin des Trois Fontaines.

Dans le cas du puits de la Bissaugerie, la colonne d'eau est homogène en hautes et basses eaux pour les quatre paramètres, avec cependant des valeurs de conductivité et de température, variables en fonction du temps (arrivée d'eau froide entre janvier et avril 2003 par exemple). Les concentrations en cations et anions, identiques sur toute la colonne lors des campagnes de prélèvement effectuées en hautes eaux (avril 2003) et en basses eaux (novembre-décembre 2003), permettent de penser que l'homogénéité observée pour les paramètres physico-chimiques est aussi valable pour la composition chimique. Par ailleurs, le renouvellement de l'eau dans ce puits est relativement rapide, comme les tests de pompages effectués en avril 2003 ont pu le montrer (voir Guigues *et al.*, 2003).

Par conséquent, il est possible d'en déduire que la zone active du puits, c'est-à-dire la zone où la nappe circule correspond à toute la hauteur (28-42 m). **Ainsi, n'importe quelle profondeur peut être choisie pour effectuer le prélèvement ou pour positionner la sonde multiparamètre BRGM.**

À l'inverse, le puits des Glandons est caractérisé par une hétérogénéité importante en hautes eaux, qui tend à se résorber en basses eaux. Cette hétérogénéité est provoquée par l'arrivée d'eau froide en hiver et par le fait que la vitesse de renouvellement de l'eau dans le puits est très lente, comme les tests de pompage effectués en mars 2003 l'ont montrée (Guigues *et al.*, 2003). Par ailleurs, les résultats des concentrations en cations et anions, lors des campagnes de prélèvement effectuées en hautes eaux (avril 2003) et en basses eaux (novembre-décembre 2003) à trois profondeurs différentes, montrent que l'hétérogénéité en hautes eaux et

l'homogénéité en basses eaux observées pour les paramètres physico-chimiques sont aussi valables pour la composition chimique. Ainsi, la zone active du puits semble être située entre 22 et 30 m, comme les profils conductivité et oxygène dissous le montrent. **La profondeur à laquelle le prélèvement doit être effectué ou à laquelle la sonde multiparamètre BRGM doit être positionnée, est donc primordiale pour ce puits.**

Enfin, le puits des Grands Pressoirs présente une situation intermédiaire par rapport aux deux autres. En effet, il existe une légère hétérogénéité en surface, notamment en basses eaux (l'écart de conductivité étant de l'ordre de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour une conductivité moyenne de 950 $\mu\text{S}/\text{cm}$). La composition chimique par contre est identique sur toute la profondeur, compte tenu des incertitudes analytiques, en hautes eaux (avril 2003) et en basses eaux (novembre-décembre 2003). Par ailleurs, les tests de pompage effectués en mars 2003 ont montré que la vitesse de circulation de la nappe était assez rapide (Guigues *et al.*, 2003). Par conséquent, **la zone active du puits se situerait alors entre 14 et 20 m.**

Les trois puits étudiés présentent des comportements temporels très différents les uns des autres, illustrant ainsi l'hétérogénéité du comportement hydrodynamique du bassin. Ainsi, la caractérisation de chaque puits, avant d'effectuer un prélèvement ou de positionner des capteurs de mesure de la qualité de l'eau, est primordiale. En effet, des résultats très contrastés, notamment en polluants chimiques (nitrates et pesticides) peuvent être obtenus si l'hétérogénéité spatiale et temporelle des eaux n'est pas prise en compte lors de la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité de l'eau sur un bassin karstique.

Enfin, il n'est pas possible de prédire quel sera le comportement de l'atrazine (teneur et pourcentage relatif de la DEA et de la DIA) à partir des paramètres physico-chimiques ou de la composition chimique ou des nitrates du fait de l'absence de corrélations entre les polluants chimiques.

Il semble donc nécessaire, pour un suivi de ces composés dans les eaux souterraines, de disposer (et donc de développer au préalable) d'un nouveau capteur spécifique des composés organiques d'origine agricole. Celui-ci pourrait alors être implanté dans les puits, à différentes profondeurs, pour une surveillance précise et fiable de la qualité des eaux souterraines.

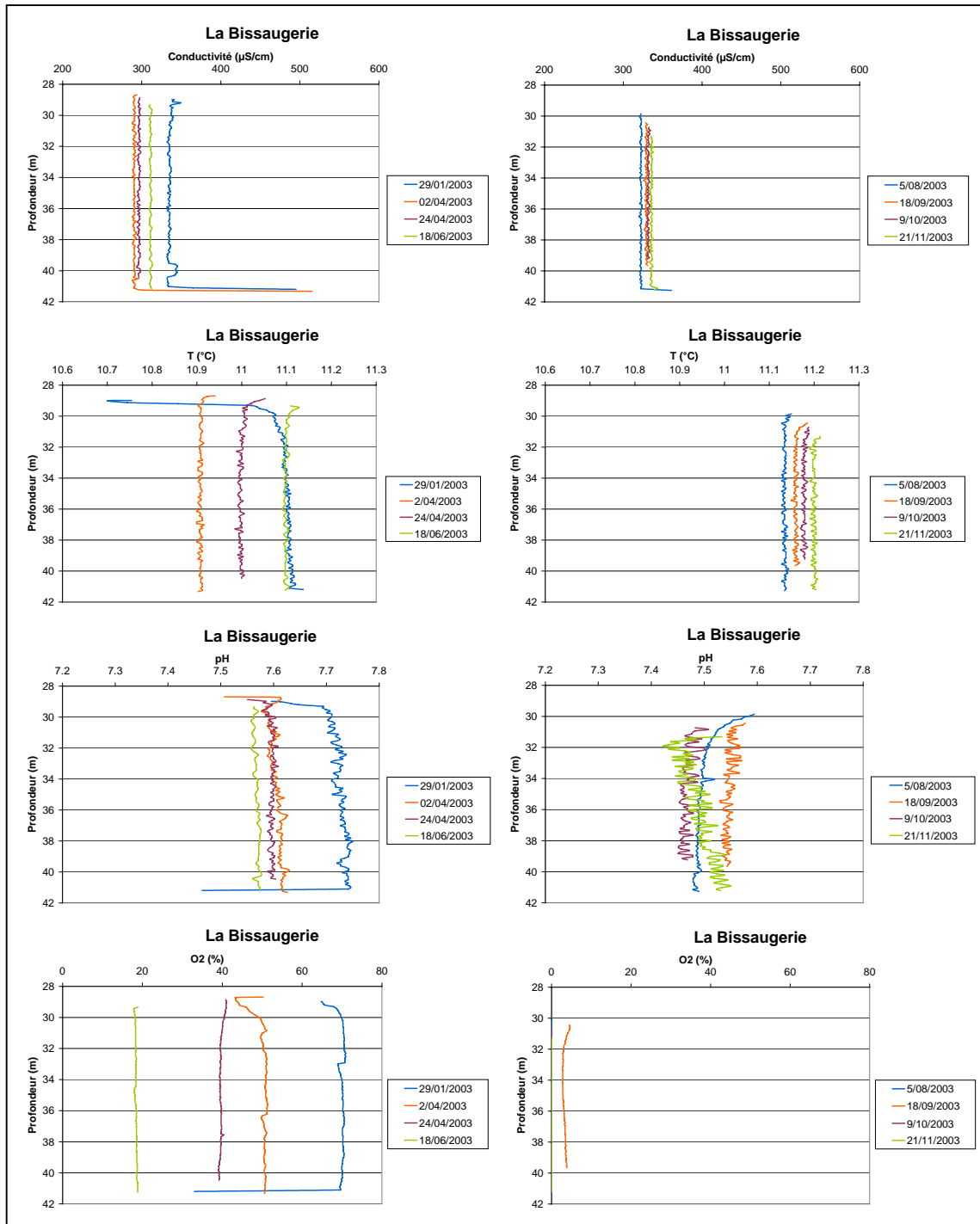


Illustration 37 - Évolution des diagraphies des paramètres physico-chimiques dans le temps – Puits de la Bissaugerie.

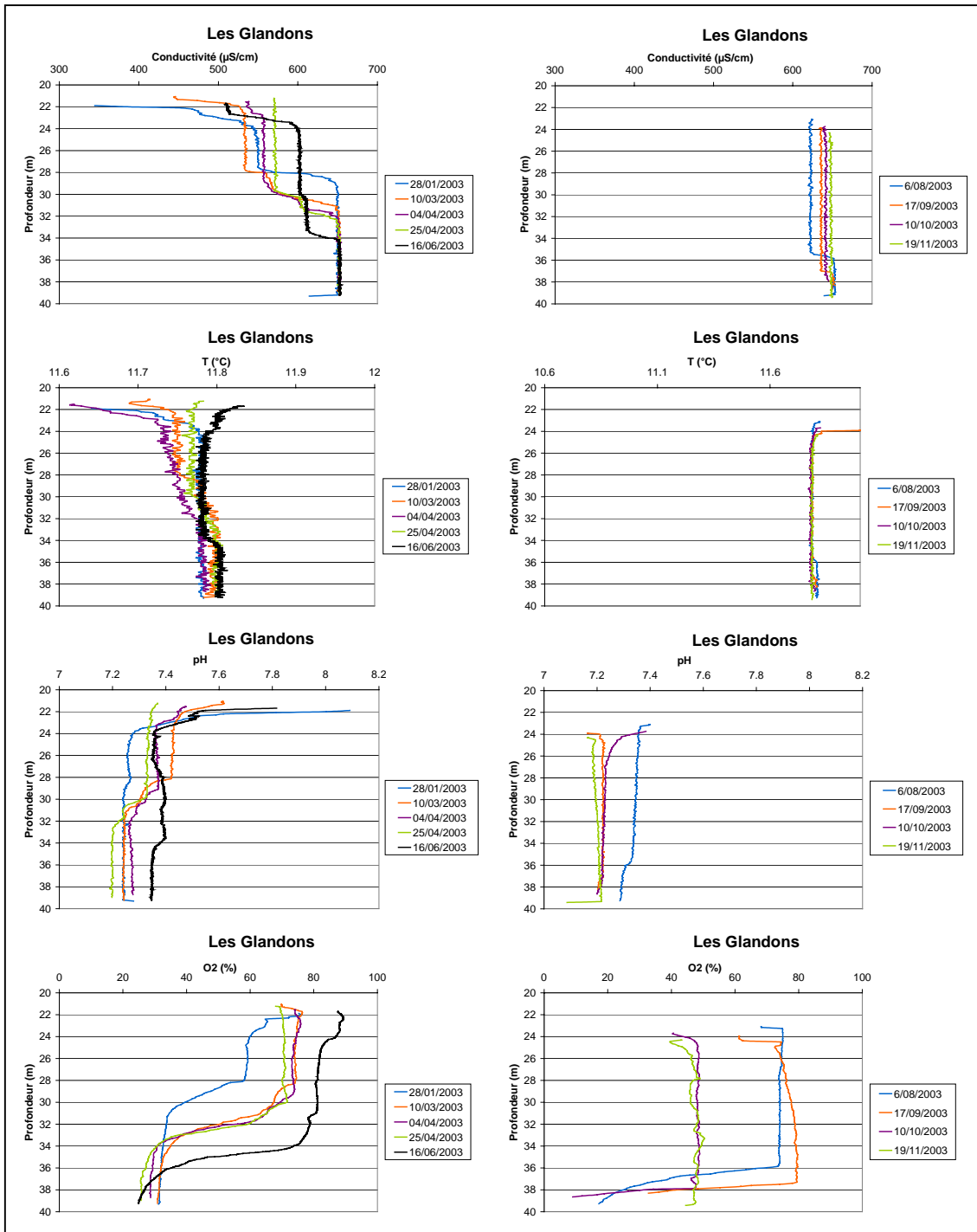


Illustration 38 - Évolution des diagraphies des paramètres physico-chimiques dans le temps – Puits des Glandons.

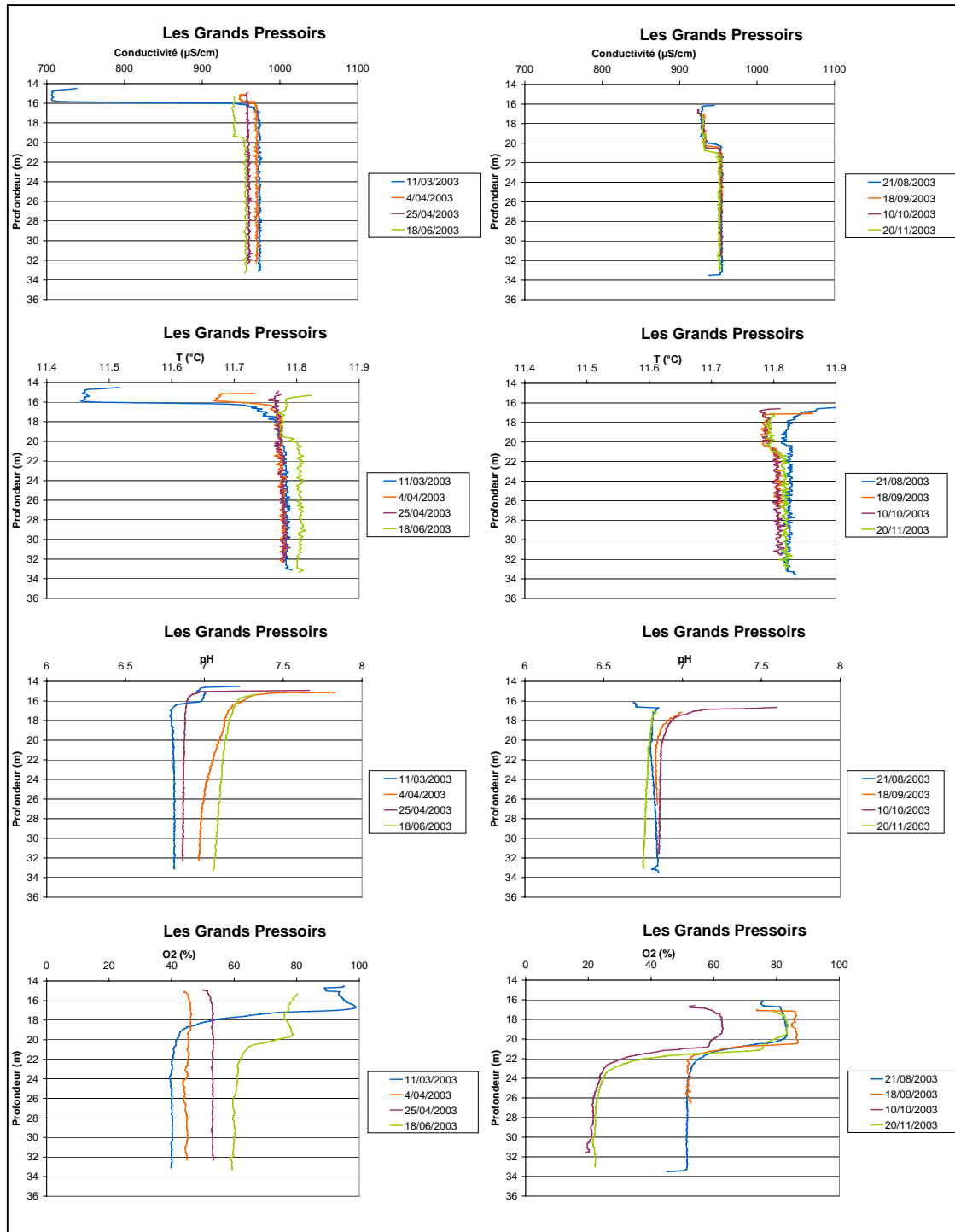


Illustration 39 - Évolution des diagaphies des paramètres physico-chimiques dans le temps – Puits des Grands Pressoirs.

4. Suivi en continu des paramètres physico-chimiques et de la concentration en chlorures et nitrates

Les sondes multiparamètres BRGM et les préleveurs automatiques ont été installés le 5 juillet 2002 sur le site de la source des Trois Fontaines et sur le site des Glandons, le 10 janvier 2003 sur le site de la Bissaugerie, et le 19 février 2003 sur le site des Grands Pressoirs.

4.1. CONDUCTIVITÉ ET TEMPÉRATURE

4.1.1. La source des Trois Fontaines

Les résultats obtenus concernant le suivi en continu à la source de la température (ill. 40) et de la conductivité à 25 °C (ill. 41) montrent que ces deux paramètres sont relativement constants sur la période étudiée malgré des amplitudes importantes pendant certaines périodes (été 2002, printemps et été 2003 et jusqu'à mi-novembre 2003). Ceci s'explique par le très faible niveau de la source et donc le rééquilibrage avec la température extérieure des capteurs (après l'été 2002, les capteurs ont été mis dans une large coupelle en plastique pour éviter qu'ils ne soient à sec). La conductivité moyenne mesurée par la sonde à 25 °C est de $590 \pm 20 \mu\text{S/cm}$, avec une température moyenne de $11,6 \pm 1,0 \text{ °C}$. Les valeurs mesurées *in situ* au moyen d'un conductimètre de terrain sont respectivement de $617 \pm 18 \mu\text{S/cm}$ et $12,1 \pm 0,4 \text{ °C}$ montrant que la sonde est très légèrement décalée en température (0,5 °C) alors que les conductivités ne sont pas significativement différentes.

4.1.2. La Bissaugerie

Les résultats obtenus concernant le suivi en continu sur le puits de la Bissaugerie de la température (ill. 42) et la conductivité à 25 °C (ill. 43) mettent en évidence l'importance de suivre en continu ces paramètres dans un bassin karstique. En effet, une arrivée importante d'eau froide a eu lieu le 3 février 2003, probablement suite à la fonte de la neige tombée la semaine précédente (environ 15 cm). La conductivité chute alors de 370 à 250 $\mu\text{S/cm}$, et la température de 10,7 à 6,5 °C lors de cet événement pour revenir lentement vers des valeurs voisines de 360 $\mu\text{S/cm}$ et 10,8 °C.

4.1.3. Les Glandons

Les résultats obtenus concernant le suivi en continu sur le puits des Glandons de la température (ill. 44) et la conductivité à 25 °C (ill. 45) montrent que de juillet à décembre 2002 ces paramètres sont relativement stables. Par contre de fin décembre 2002 à mai 2003, des variations importantes sont observées. De plus, l'arrivée

importante d'eau froide, qui a eu lieu le 3 février 2003 sur le puits de la Bissaugerie, est observée avec un jour de décalage, probablement du fait de la vitesse faible de circulation de la nappe au niveau du puits des Glandons par rapport à celui de la Bissaugerie. La conductivité (à 25 °C) chute de 600 à 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et la température seulement de 0,2 °C lors de cet événement. La faible amplitude observée, notamment en température, est certainement due au fait que les capteurs de la sonde ne sont pas situés dans la zone active du puits qui se trouve 5 m plus bas (la pression exercée sur la sonde si elle était descendue à ce niveau serait trop forte). Cela reflète donc en fait le temps d'homogénéisation de la colonne d'eau qui est relativement long pour ce puits. Enfin, la conductivité remonte progressivement d'avril à décembre 2003, pour atteindre une valeur de 660 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.1.4. Les Grands Pressoirs

Les résultats obtenus concernant le suivi en continu sur le puits des Grands Pressoirs de la température (ill. 46) et la conductivité à 25 °C (ill. 47) montrent que ces paramètres sont très stables sur la période étudiée à l'exception de quelques jours suivant le 11 mars 2003, date à laquelle le test de pompage a été réalisé. La conductivité à 25 °C est en moyenne de $1\,010 \pm 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ et la température moyenne est de $10,9 \pm 0,1 \text{ °C}$.

D'une manière générale, les mesures effectuées avec un conductimètre de terrain sur les échantillons prélevés lors des campagnes de mesures sont en bon accord avec les valeurs mesurées *in situ* par les sondes multiparamètres BRGM.

Par ailleurs, comme cela a été vu dans le paragraphe précédent, les variations de la conductivité sont très différentes, avec la source et le puits des Grands Pressoirs qui sont caractérisés par une conductivité stable alors que le puits de la Bissaugerie présente une chute importante de conductivité lors d'un apport rapide d'eau atmosphérique et que le puits des Glandons est caractérisé par des variations importantes de conductivité sur une longue période (5 mois).

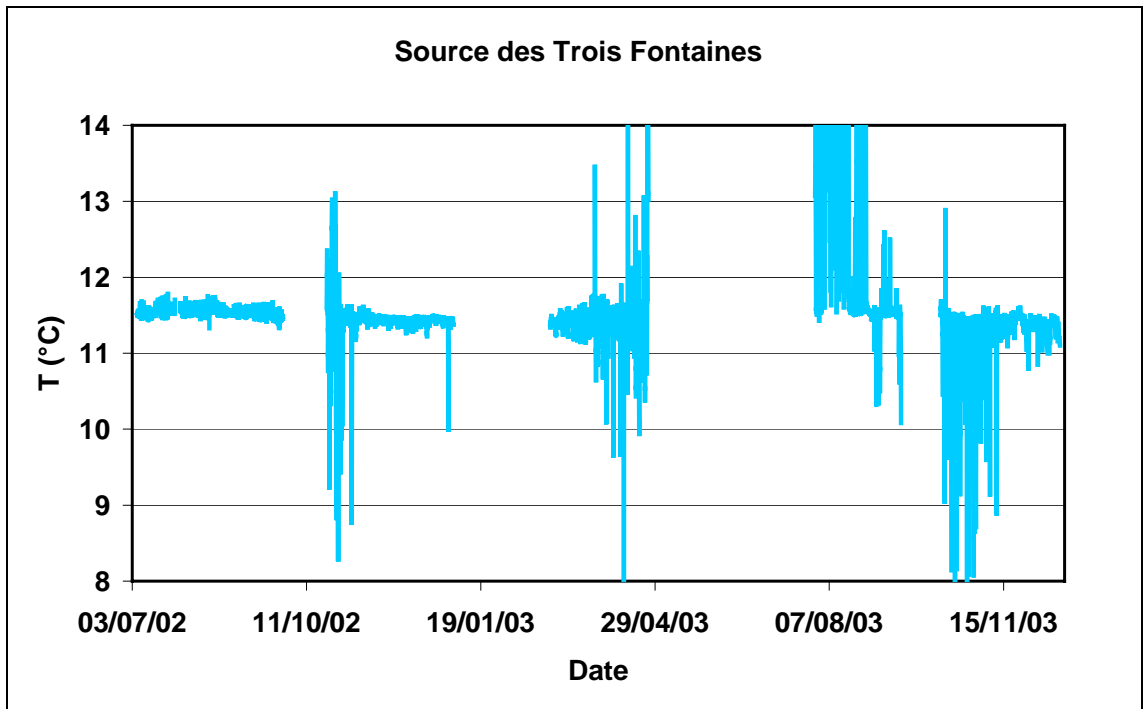


Illustration 40 - Suivi en continu de la température – Source des Trois Fontaines.

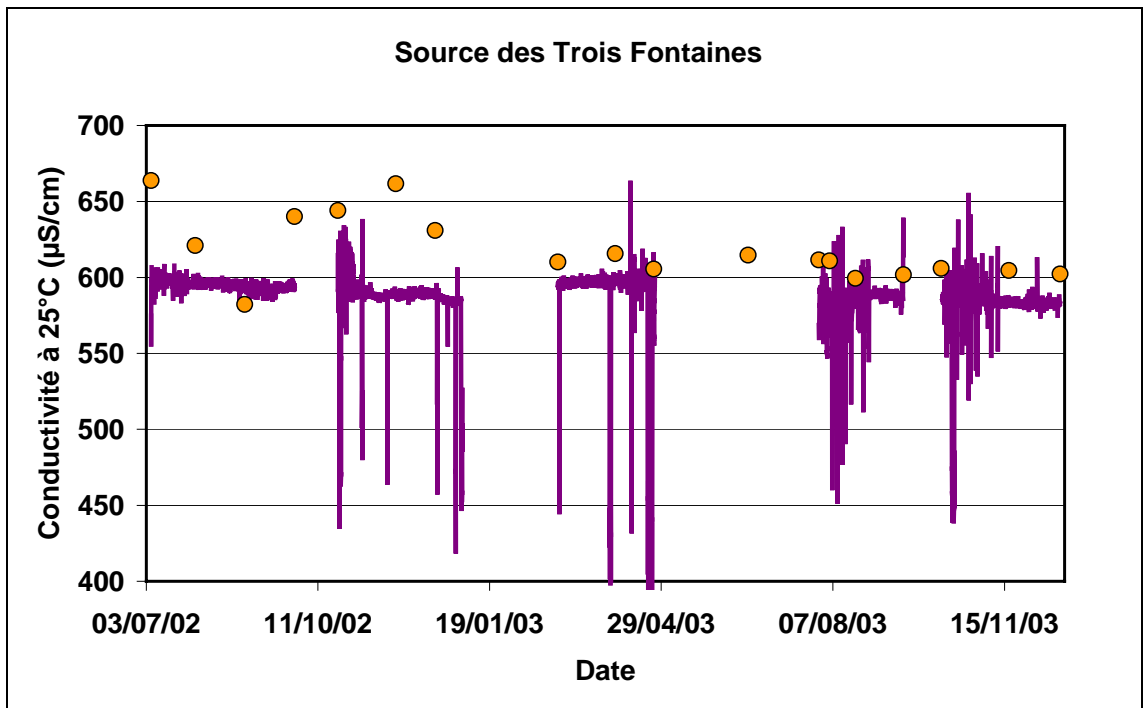


Illustration 41 - Suivi en continu de la conductivité à 25 °C et mesures ponctuelles – Source des Trois Fontaines.

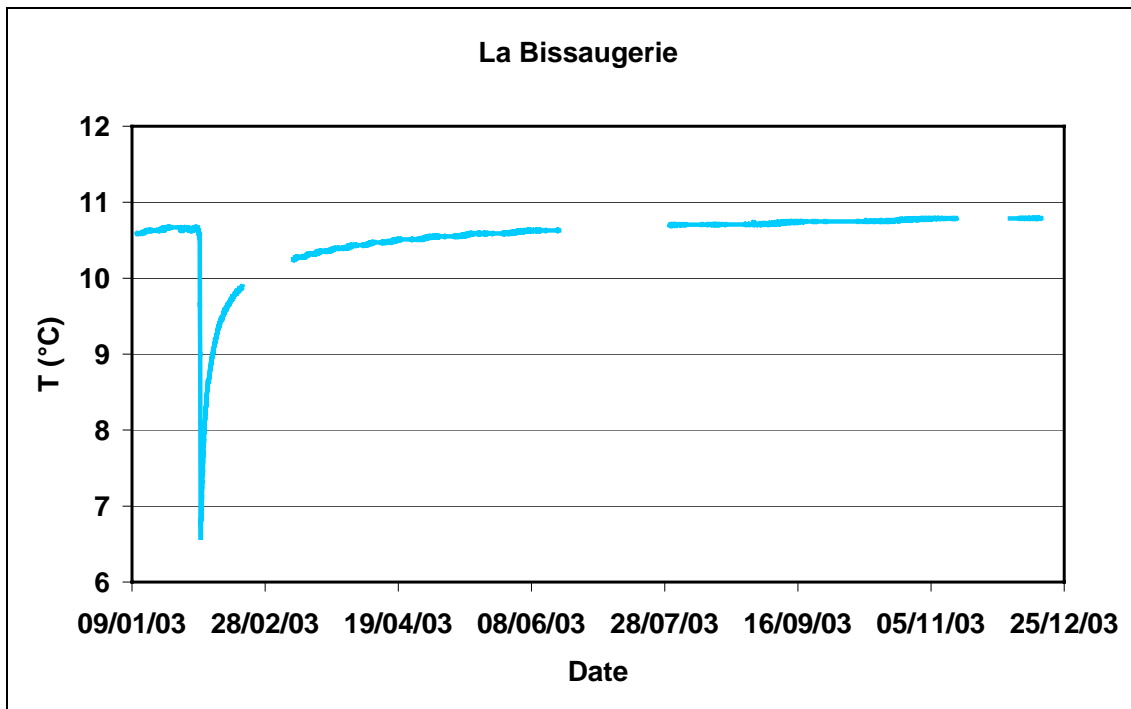


Illustration 42 - Suivi en continu de la température – Puits de la Bissaugerie.

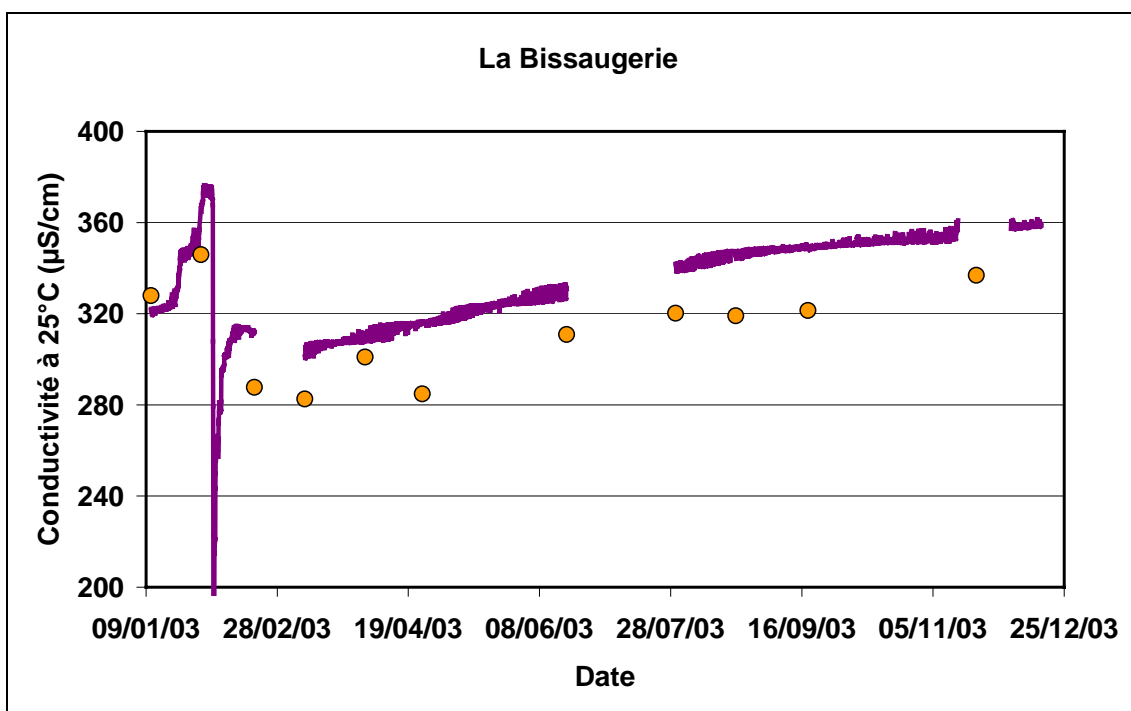


Illustration 43 - Suivi en continu de la conductivité à 25 °C et mesures ponctuelles – Puits de la Bissaugerie.

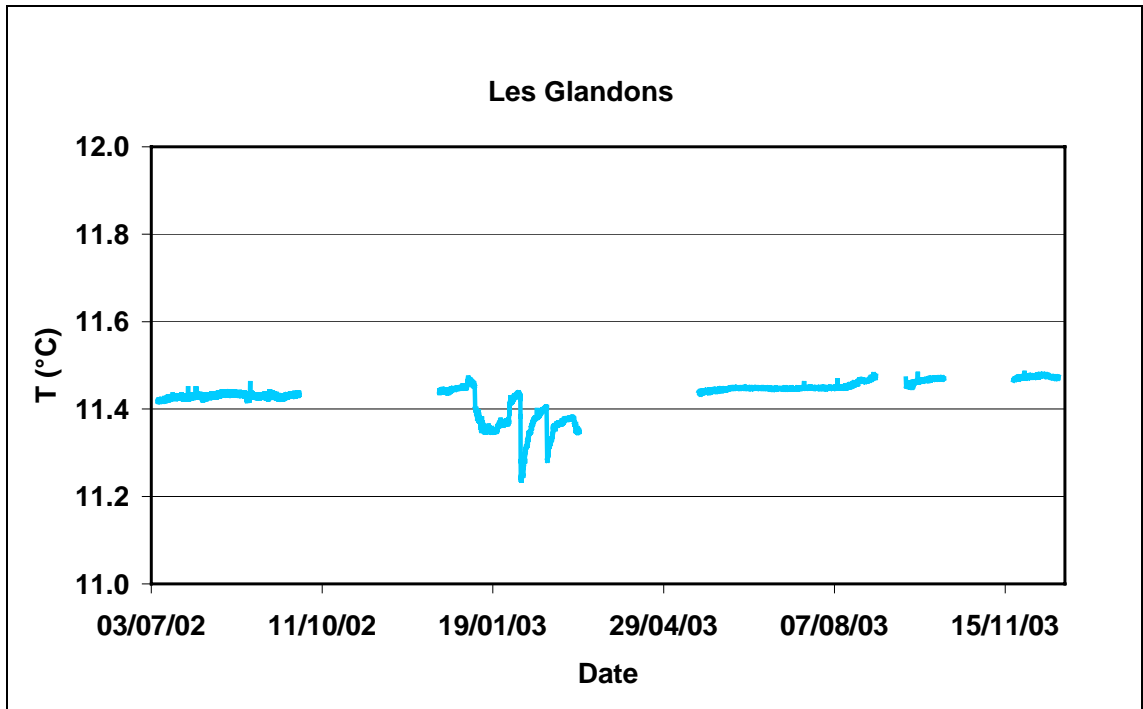


Illustration 44 - Suivi en continu de la température – Puits des Glandons.

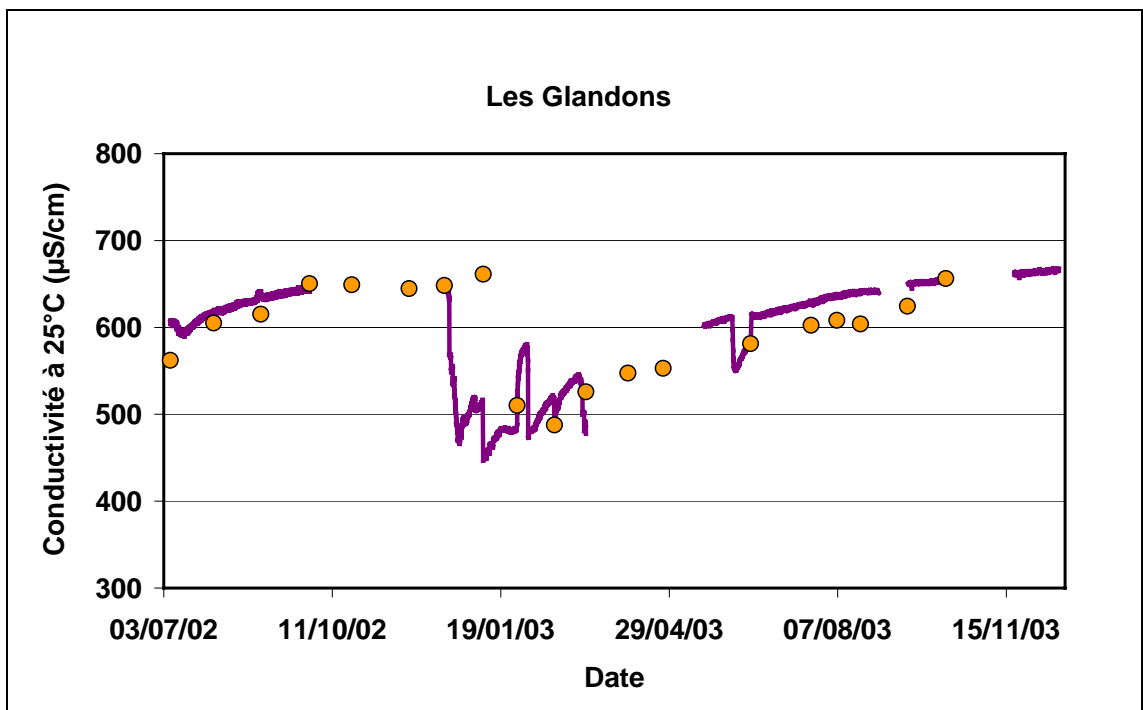


Illustration 45 - Suivi en continu de la conductivité à 25 °C et mesures ponctuelles – Puits des Glandons.

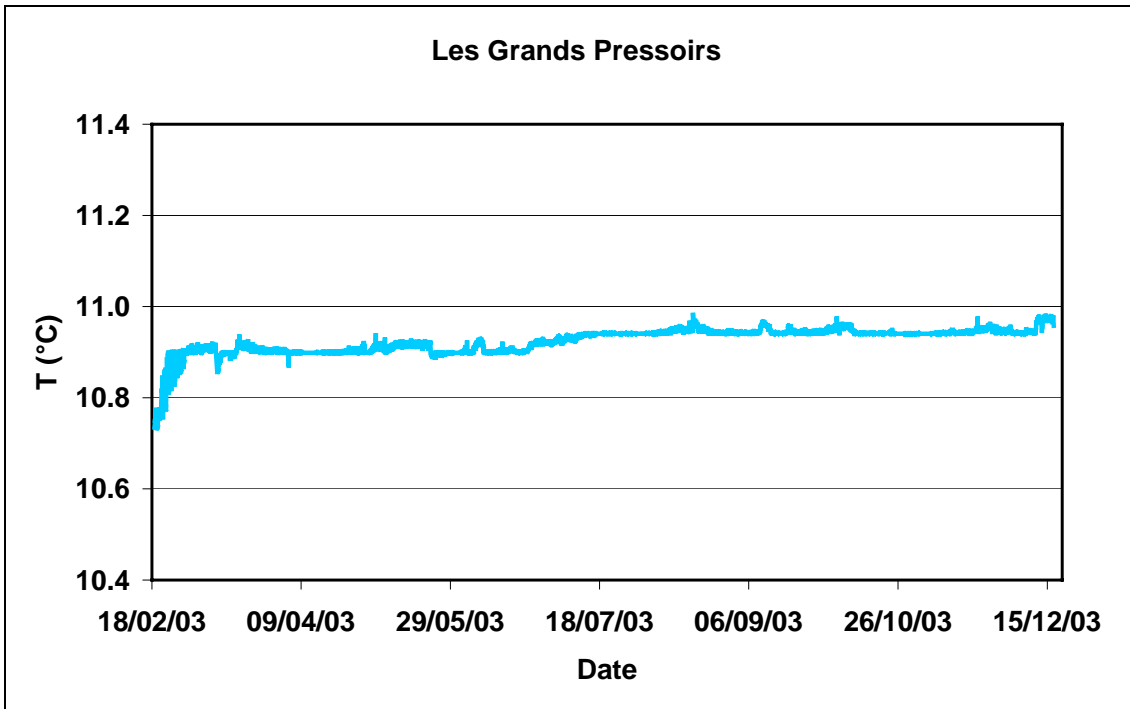


Illustration 46 - Suivi en continu de la température – Puits des Grands Pressoirs.

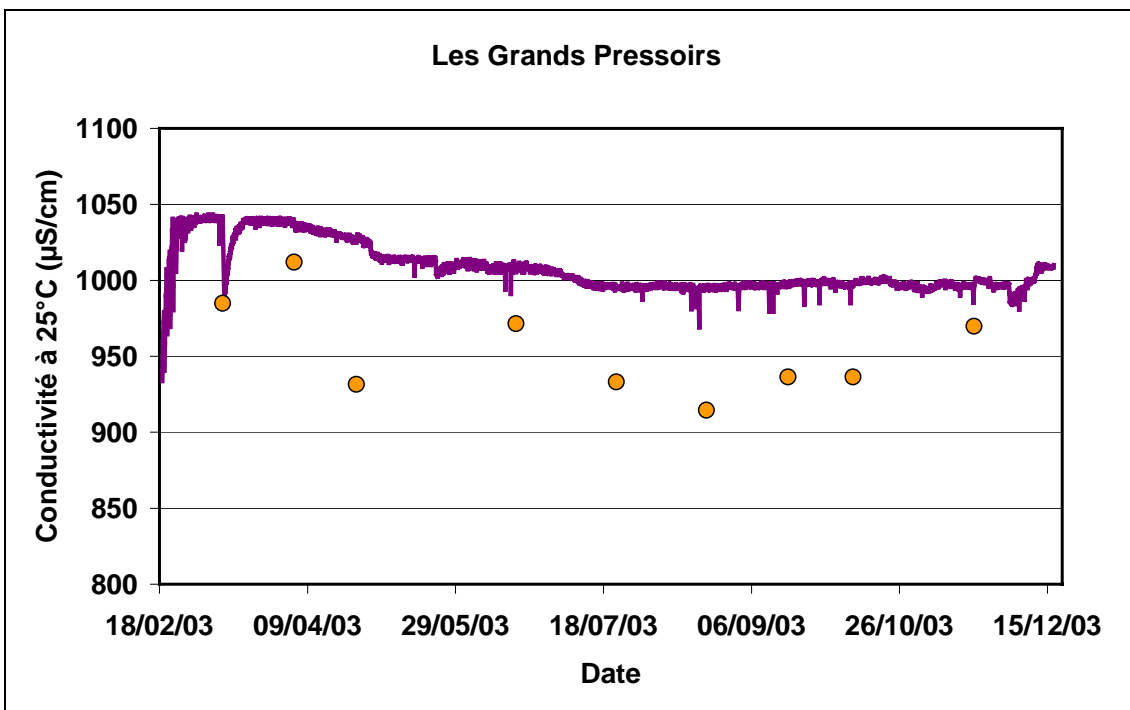


Illustration 47 - Suivi en continu de la conductivité à 25 °C et mesures ponctuelles – Puits des Grands Pressoirs.

4.2. CHLORURES ET NITRATES

La méthodologie utilisée pour traiter les données brutes (potentiels) mesurées par les sondes multiparamètres est la suivante : la concentration en chlorures ou nitrates de chaque point de mesure a été estimée en calculant la moyenne des concentrations obtenues pour chaque étalonnage effectué sur site par la méthode des ajouts dosés sur une période définie. L'écart type associé calculé est alors représentatif à la fois de l'incertitude analytique (méthode des ajouts dosés) et de la variabilité des électrodes dans le temps (dérive due au vieillissement, interférences et force ionique variables, bio-fouling).

4.2.1. Source des Trois Fontaines

Les concentrations en chlorures et nitrates des échantillons prélevés à la Source sont comprises respectivement entre 15 et 27 mg/l et entre 44 et 62 mg/l (ill. 48 et 52). Différents problèmes techniques (principalement une dérive des électrodes après quelques jours d'immersion dans la source alors que l'étalonnage des électrodes ne mettaient pas en évidence ce problème, voir ill. 56) n'ont pas permis d'obtenir un suivi en continu cohérent des concentrations en chlorures et nitrates au moyen de la sonde multiparamètre jusqu'en juillet 2003 (ill. 48 et 52). Le changement de l'électrode de référence en juillet 2003 a permis d'obtenir des résultats corrects jusqu'en décembre 2003. Les concentrations en chlorures et en nitrates sont relativement constantes sur la période étudiée (juillet-décembre 2003), une fois les électrodes stabilisées dans le milieu. Enfin, l'écart type moyen pour chaque concentration en chlorures et en nitrates calculée à partir de l'ensemble des étalonnages réalisées sur cette période est de l'ordre de 3 et 8 mg/l respectivement.

4.2.2. La Bissaugerie

Les concentrations en chlorures et nitrates des échantillons prélevés à la Bissaugerie sont comprises respectivement entre 6 et 9 mg/l et entre 3 et 12 mg/l (ill. 49 et 53). Les mesures effectuées par la sonde multiparamètre sont relativement cohérentes avec les concentrations déterminées dans les échantillons, compte tenu des faibles teneurs mesurées, proches de la limite de quantification des électrodes sélectives, à l'exception de la période de mi-mars à mi-juin 2003 (ill. 49 et 53).

Le contrôle de l'étalonnage par ajouts dosés des électrodes sélectives aux chlorures et aux nitrates montre que jusqu'au 10 mars 2003, les électrodes ne dérivent pas (ill. 57). Par contre un décalage des potentiels est observé à partir du 10 mars, plus fortement marqué pour l'électrode sélective aux nitrates. Cette dérive se traduit par un signal mesuré par la sonde qui augmente anormalement à compter du 18 mars 2003 pour les deux électrodes sélectives (ill. 49 et 53). Le changement de l'électrode de référence courant juillet 2003 a permis de résoudre ce problème. Ces résultats montrent aussi, que lors de la crue du 3 février 2003, la concentration en chlorures diminue légèrement du fait de la dilution alors que la concentration en nitrates augmente, probablement en raison du lessivage des sols riches en nitrates. La concentration en chlorures et en nitrates mesurée par la sonde est stable sur la période août-décembre 2003. L'écart type moyen pour chaque concentration en chlorures et en nitrates calculée à partir de

l'ensemble des étalonnages réalisées sur cette période est de l'ordre de 2 mg/l et 1,5 mg/l respectivement. Enfin l'écart entre les teneurs mesurées par la sonde et celles analysées dans les échantillons prélevés est de $1,0 \pm 1,6$ mg/l et de $1,3 \pm 3,0$ mg/l pour les chlorures et les nitrates respectivement sur l'ensemble de la période d'étude à l'exception de 3 mois, entre mi-mars et mi-juin.

4.2.3. Les Glandons

Les concentrations en chlorures et nitrates des échantillons prélevés aux Glandons sont comprises respectivement entre 10 et 20 mg/l et entre 10 et 45 mg/l (ill. 50 et 54). Les mesures effectuées par la sonde multiparamètre sont relativement cohérentes avec les concentrations déterminées dans les échantillons (ill. 50 et 54). Deux périodes (été 2002 et année 2003) ont été définies pour estimer les concentrations en chlorures et nitrates à partir des potentiels mesurés par la sonde et des courbes d'étalonnage établies sur site par ajouts dosés. Ainsi, l'écart type moyen pour chaque concentration en chlorures et en nitrates calculée à partir de l'ensemble des étalonnages réalisées pendant l'été 2002 est de l'ordre de 1,5 et 7 mg/l respectivement, et pour l'année 2003 de l'ordre de 2,5 et 9,5 mg/l respectivement. Par ailleurs, une période d'environ trois semaines est cependant nécessaire pour stabiliser les électrodes sélectives dans le milieu, correspondant grossièrement au développement d'un film bactérien d'épaisseur constante autour des électrodes.

Cependant, dans le cas des nitrates une variabilité importante est observée en août 2002 dans les échantillons prélevés qui n'apparaît pas sur l'enregistrement de la sonde (ill. 54). La très bonne corrélation entre les teneurs en nitrates et en nitrites dans ces échantillons permettent de supposer que les nitrates ont été réduits, probablement par des bactéries dénitrifiantes ou des réducteurs chimiques présents dans les eaux, dans les flacons de prélèvement du préleveur automatique et non *in situ*. Ainsi l'écart entre les teneurs mesurées par la sonde et celles analysées dans les échantillons prélevés est de $1,3 \pm 1,3$ mg/l et de $0,2 \pm 5,1$ mg/l pour les chlorures et les nitrates respectivement.

Ces résultats montrent aussi, que lors de la crue du 4 février 2003, les concentrations en chlorures et nitrates diminuent légèrement du fait de la dilution. S'il y a eu un apport en nitrates par le lessivage des sols celui-ci n'est pas suffisant pour être observé, compte tenu de la réponse du puits très lente. Par contre les décalages observés depuis décembre 2002 entre la sonde et les prélèvements peuvent être aussi dûs au fait que la crépine du préleveur automatique et les capteurs ne sont pas exactement situés à la même profondeur dans une colonne d'eau hétérogène.

Le contrôle de l'étalonnage par ajouts dosés des électrodes sélectives aux chlorures et aux nitrates montre que les électrodes ne dérivent pas, même après pratiquement 12 mois de suivi en 2003 (ill. 58).

4.2.4. Les Grands Pressoirs

Les concentrations en chlorures et nitrates des échantillons prélevés sont comprises respectivement entre 28 et 44 mg/l et entre 84 et 96 mg/l (ill. 51 et 55).

Les mesures effectuées par la sonde multiparamètre sont relativement cohérentes avec les concentrations déterminées dans les échantillons (ill. 51 et 55). La lente stabilisation des électrodes dans le milieu fait que l'écart type moyen pour chaque concentration en chlorures et en nitrates calculée à partir de l'ensemble des étalonnages réalisées sur cette période est particulièrement élevé pour les nitrates, de l'ordre de 21 mg/l, alors qu'il est de l'ordre de 3 mg/l pour les chlorures. Par ailleurs, les concentrations en chlorures et en nitrates sont en légère décroissance depuis février 2002. Comme pour les autres sondes, une période d'environ trois semaines est nécessaire pour stabiliser les électrodes sélectives dans le milieu, correspondant grossièrement au développement d'un film bactérien d'épaisseur constante autour des électrodes. Ainsi, l'écart entre les teneurs mesurées par la sonde et celles analysées dans les échantillons prélevés est de $4,7 \pm 2,2$ mg/l et de $9,4 \pm 11$ mg/l pour les chlorures et les nitrates respectivement.

Le contrôle de l'étalonnage par ajouts dosés des électrodes sélectives aux chlorures et aux nitrates montre que les électrodes dérivent très légèrement (ill. 59). Il n'est pas possible de mettre en évidence de périodes différentes avec des étalonnages caractéristiques.

De même que pour la conductivité, les variations dans le temps des teneurs en chlorures et en nitrates sont très différentes, avec la Source et le puits des Grands Pressoirs qui sont caractérisés par des concentrations stables alors que les teneurs en nitrates augmentent légèrement sur le puits de la Bissaugerie lors d'un apport rapide d'eau atmosphérique. Enfin, le puits des Glandons est caractérisé par des variations importantes de concentration en chlorures et en nitrates sur une longue période (5 mois).

D'une manière générale il existe une bonne adéquation entre les concentrations en chlorures et en nitrates mesurées par les sondes multiparamètres et analysés par chromatographie ionique dans les échantillons prélevés pour l'ensemble des sites étudiés. Cependant quelques problèmes de dérive de l'électrode de référence peuvent avoir lieu, facilement identifiables par des augmentations anormales des concentrations en chlorures et nitrates et une évolution anormale du pH. **La durée de vie de électrode de référence a donc été estimée à environ 1 an.** En ce qui concerne les électrodes sélectives nitrates et chlorures, **un entretien minimum tous les 3 mois est suffisant** (remplissage de l'électrolyte interne et nettoyage de la membrane - biofilm). De plus, ces électrodes peuvent être changées sur site si cela s'avère nécessaire (changement uniquement de la membrane sans changement du corps de l'électrode).

Enfin, **l'incertitude associée** à la mesure en continu des **chlorures** au moyen des sondes multiparamètres (1 écart type) est de l'ordre de **2-3 mg/l** quelque soit le niveau de concentration en chlorures (soit 7,5-25 %). **L'incertitude associée** à la mesure en continu des **nitrates** au moyen des sondes multiparamètres est par contre comprise entre **15 et 25 %** et **dépend de la concentration** en nitrates.

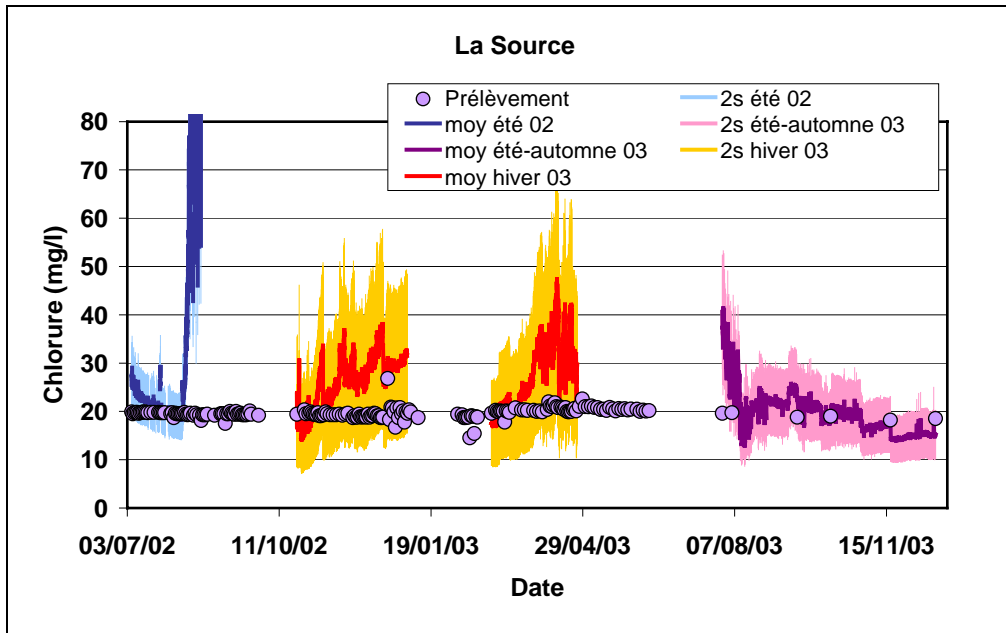


Illustration 48 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en chlorures – Source des Trois Fontaines.

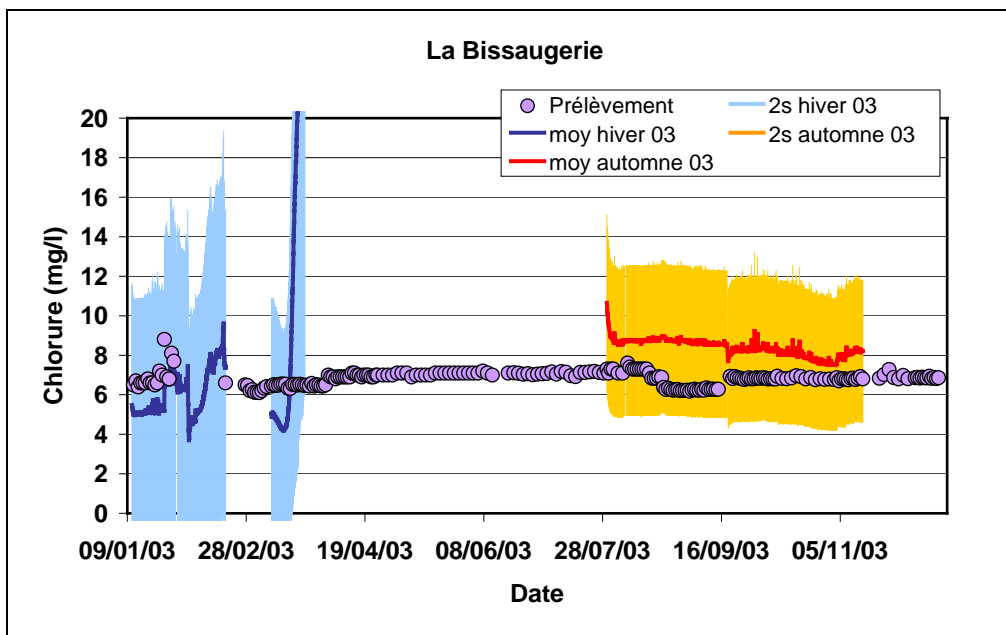


Illustration 49 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en chlorures – Puits de la Bissaugerie.

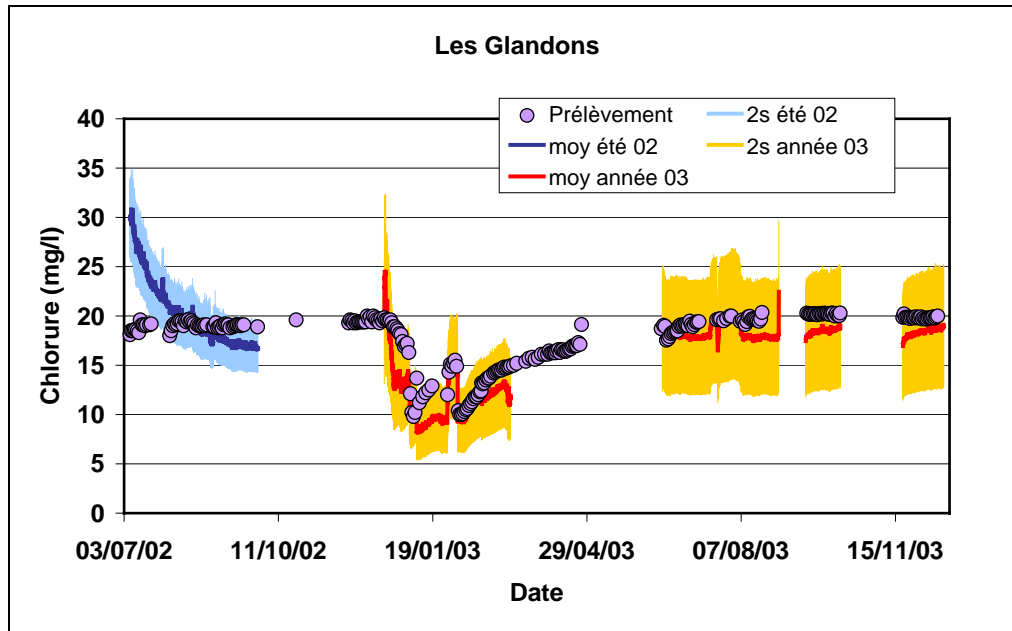


Illustration 50 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en chlorures – Puits des Glandons.

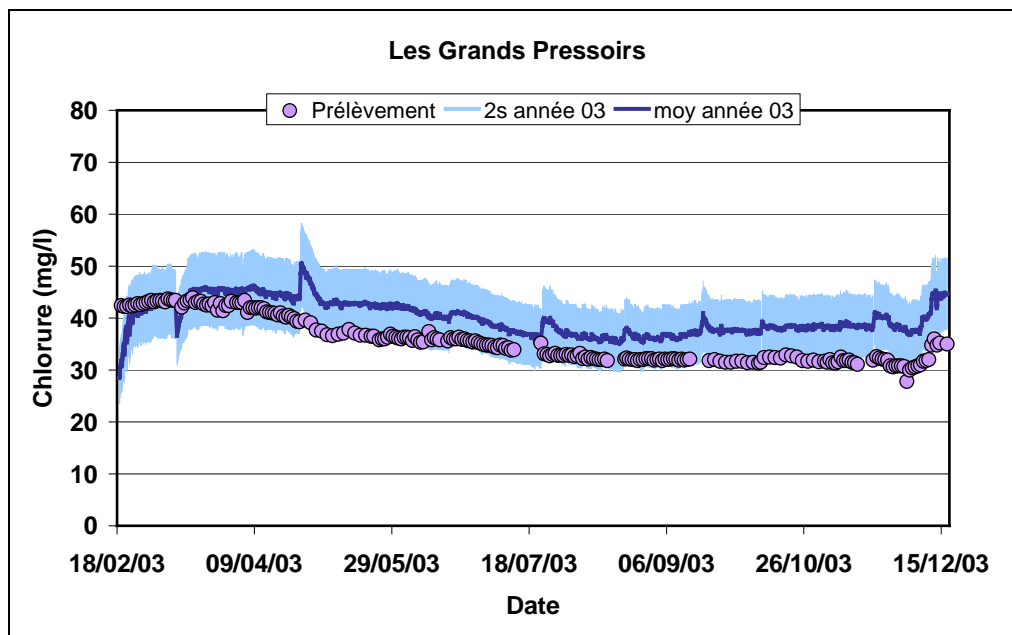


Illustration 51 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en chlorures – Puits des Grands Pressoirs.

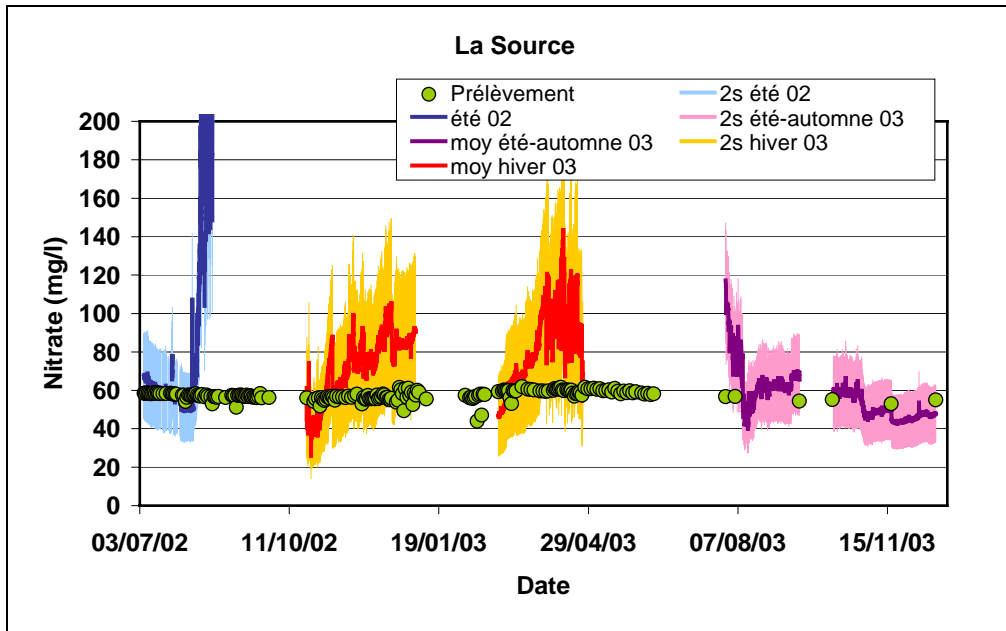


Illustration 52 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en nitrates – Source des Trois Fontaines.

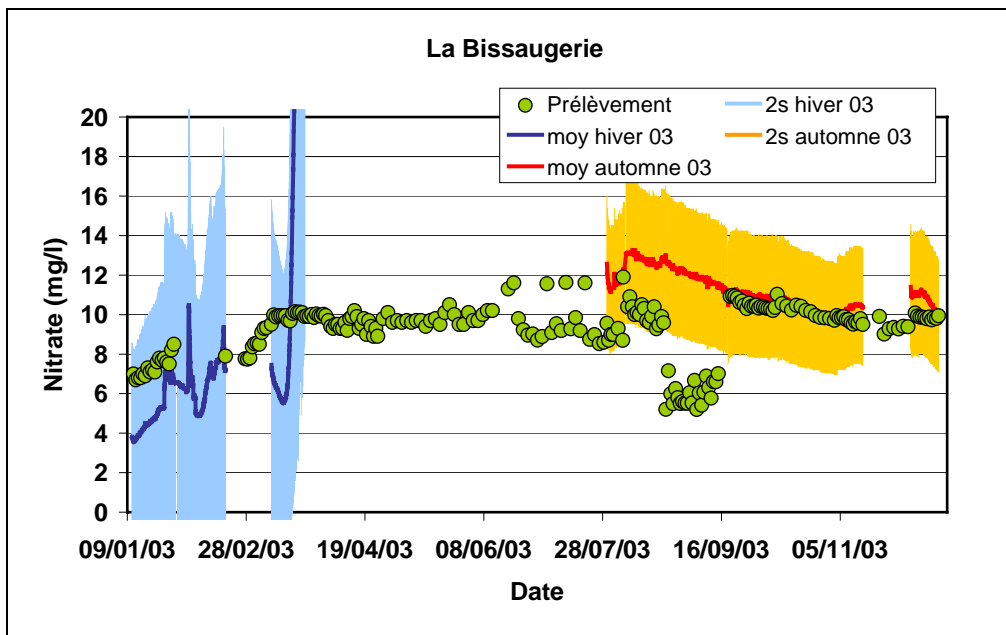


Illustration 53 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en nitrates – Puits de la Bissaugerie.

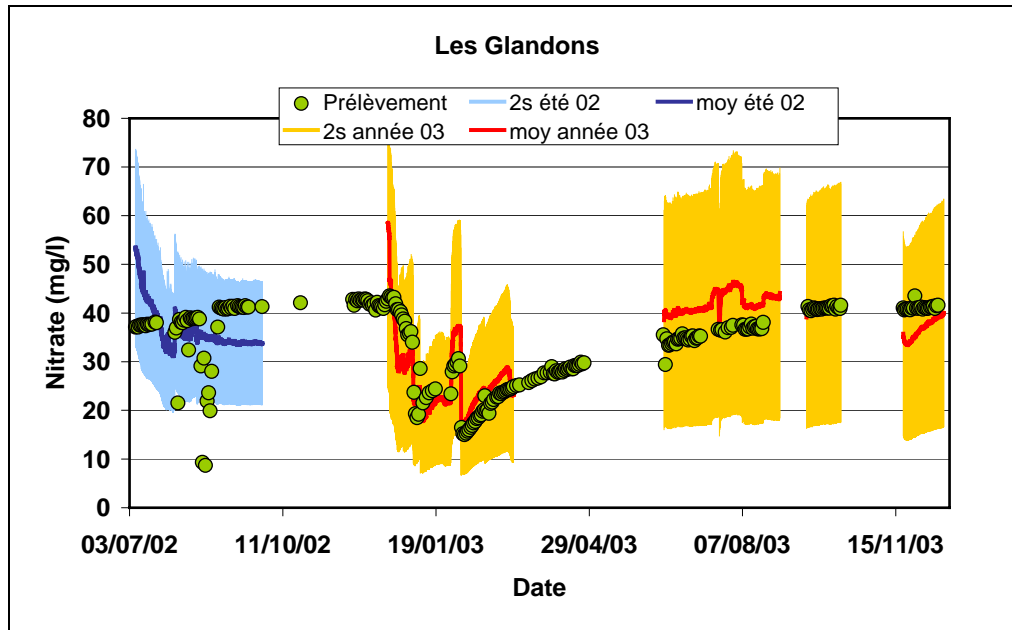


Illustration 54 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés pour chaque période sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en nitrates – Puits des Glandons.

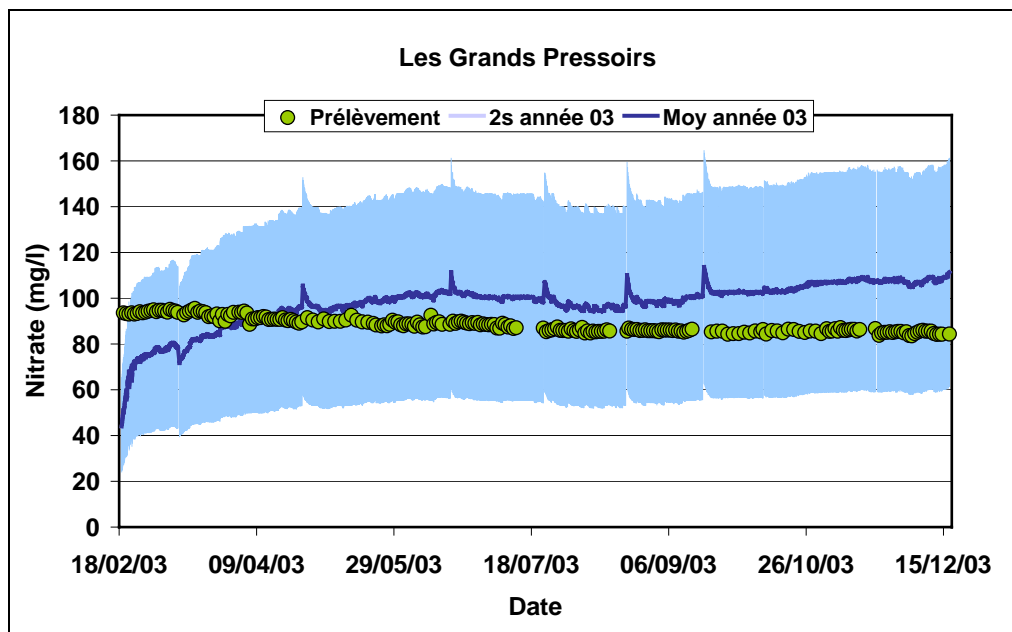


Illustration 55 - Suivi en continu (la moyenne (moy) et deux fois l'écart type (2s) calculés sont représentés) et mesures ponctuelles de la concentration en nitrates – Puits des Grands Pressoirs.

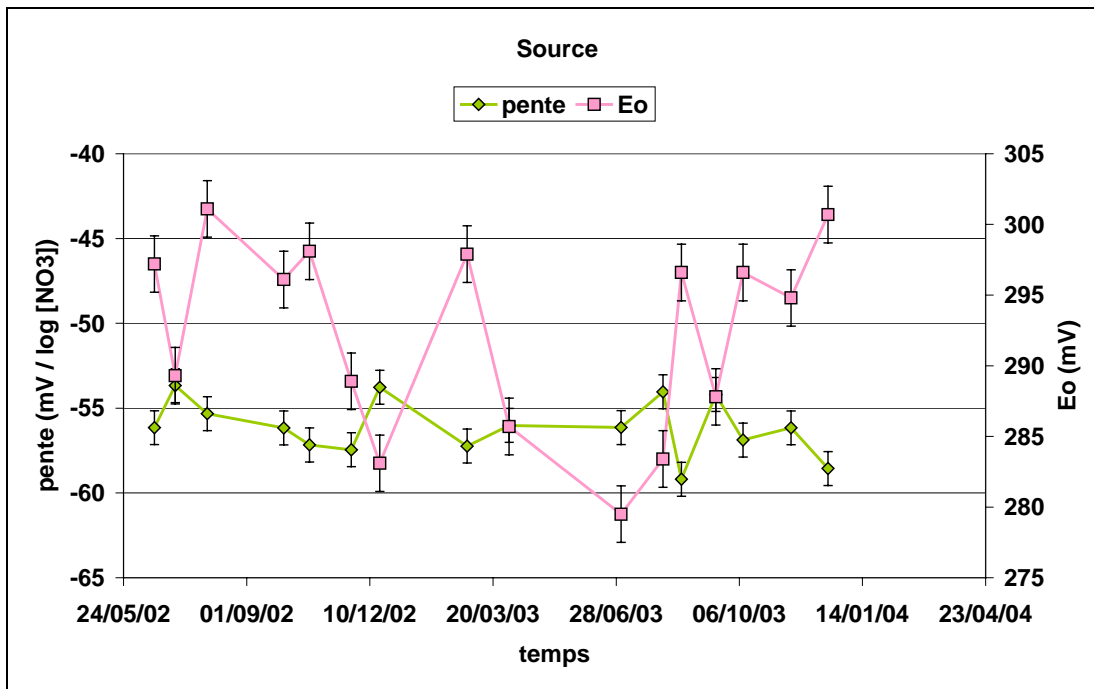


Illustration 56 - Évolution de la pente et du Eo de l'électrode sélective nitrate dans le temps – Source des Trois Fontaines.

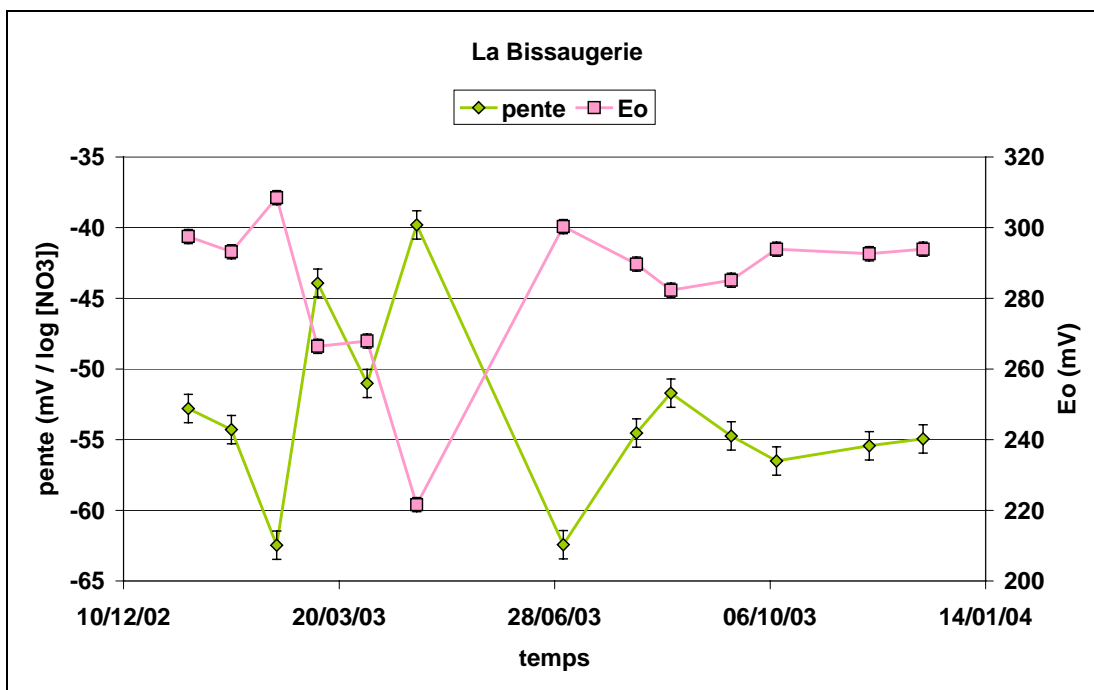


Illustration 57 - Évolution de la pente et du Eo de l'électrode sélective nitrate dans le temps – Puits de la Bissaugerie.

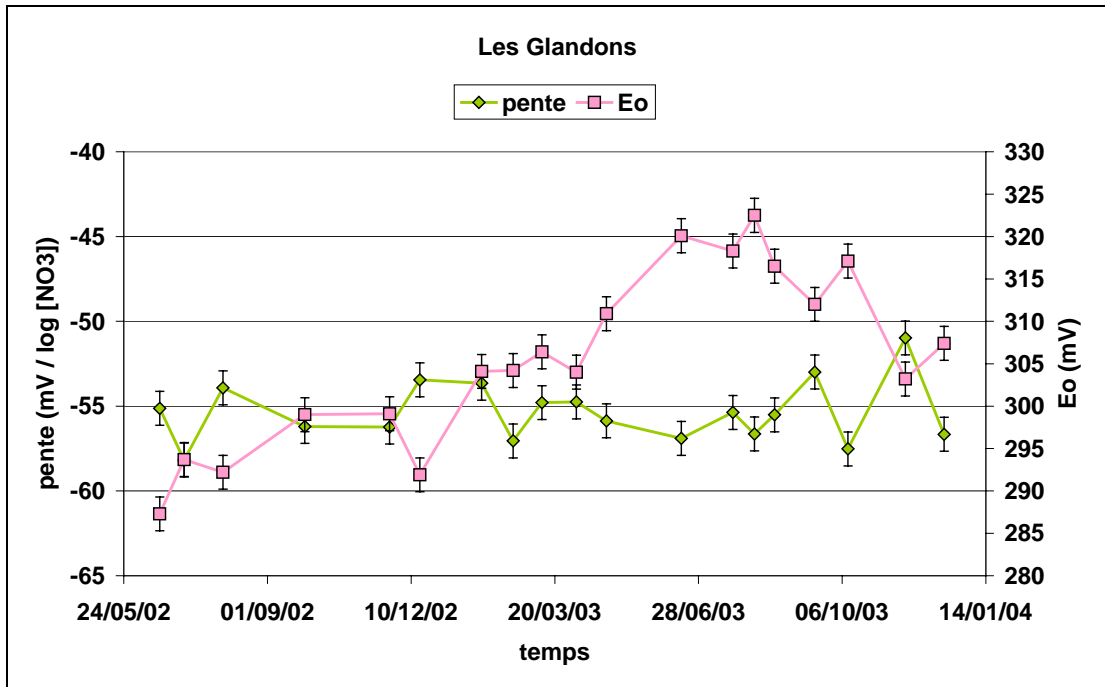


Illustration 58 - Évolution de la pente et du Eo de l'électrode sélective nitrate dans le temps – Puits des Glandons.

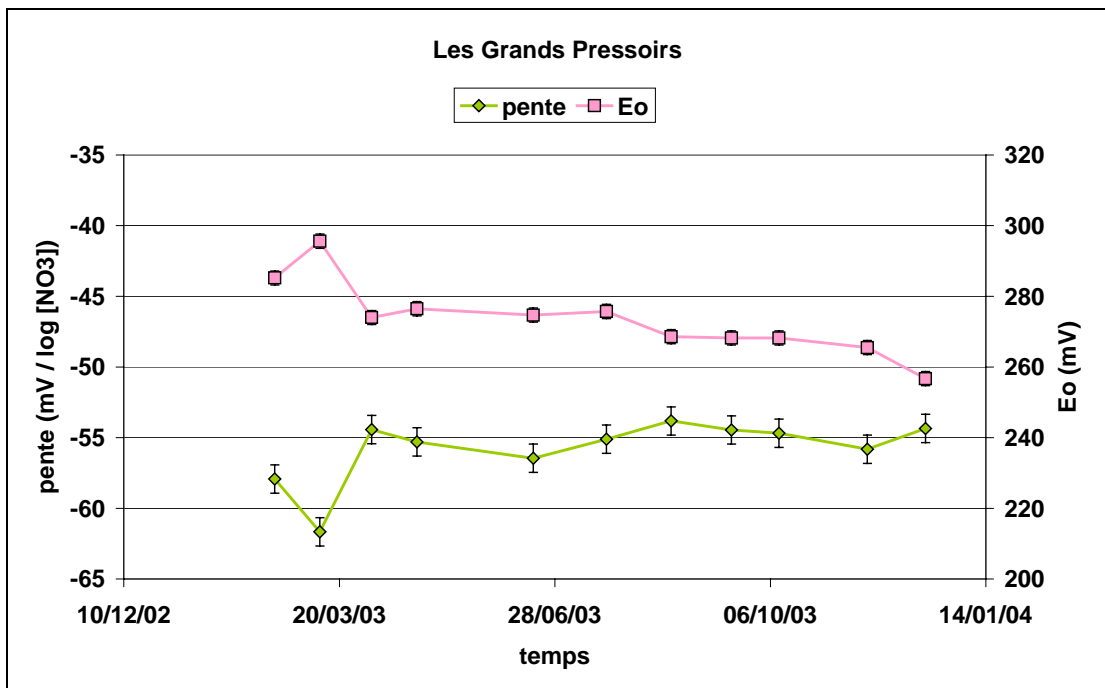


Illustration 59 - Évolution de la pente et du Eo de l'électrode sélective nitrate dans le temps – Puits des Grands Pressoirs.

5. Conclusion

Le bassin hydrographique de la source des Trois Fontaines dans le Loiret (45) a été choisi pour mettre en place un suivi de la qualité des eaux et plus particulièrement de la concentration en nitrates sur un bassin sensible du fait de la karstification de la craie et de l'activité agricole importante. La source des Trois Fontaines, ainsi que les puits des Grands Pressoirs, des Glandons et de la Bissaugerie, sont caractérisés par des teneurs en nitrates comprises entre 5 et 95 mg/l.

Les résultats des tests de pompage et des diagraphies réalisés au printemps 2003 permettent de caractériser et comparer les trois puits étudiés. Le puits des Grands Pressoirs, et dans une moindre mesure, le puits de la Bissaugerie, se rechargent assez rapidement. Il s'ensuit une bonne homogénéité des paramètres physico-chimiques sur toute la colonne d'eau dans ces deux puits. À l'inverse, le puits des Glandons se recharge très lentement ce qui induit une très forte hétérogénéité des différents paramètres physico-chimiques sur la colonne d'eau en basses eaux. Par ailleurs, des variations temporelles ont été observées pour les trois puits montrant que le suivi en continu de ces paramètres dans le temps est pleinement justifié.

Par ailleurs, lors d'une campagne de mesure en avril 2003, en hautes eaux, des prélèvements à trois profondeurs définies ont été effectués sur les puits des Glandons et des Grands Pressoirs afin d'étudier la représentativité des prélèvements réalisés. Une campagne similaire en novembre et décembre 2003, en basses eaux, a aussi été effectuée sur les mêmes puits ainsi que sur cinq autres puits (Tournerie, Hirlais, Grands Buissons, Jobards et Trois Chapeaux) afin de confirmer les résultats obtenus en avril 2003. Ainsi, les résultats montrent qu'il y a une importante variabilité de la teneur en nitrates dans la colonne d'eau de certains puits, fortement corrélée à la conductivité. À l'inverse des nitrates, il n'existe pas de relation entre la teneur en pesticides et la conductivité.

Les trois puits étudiés présentent des comportements temporels très différents les uns des autres, illustrant ainsi l'hétérogénéité spatiale sur le bassin. Ainsi, la caractérisation de chaque puits avant d'effectuer un prélèvement ou de positionner des capteurs de mesure de la qualité de l'eau est primordiale. En effet, des résultats très contrastés, notamment en polluants chimiques (nitrates et pesticides) peuvent être obtenus si l'hétérogénéité spatiale et temporelle des eaux n'est pas prise en compte lors de la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité de l'eau sur un bassin karstique. Enfin, il n'est pas possible de prédire quel sera le comportement de l'atrazine (teneur et pourcentage relatif de la DEA et de la DIA) à partir des paramètres physico-chimiques ou de la composition chimique ou des nitrates du fait de l'absence de corrélations entre les polluants chimiques.

Les résultats obtenus sur les puits de la Bissaugerie et des Glandons mettent bien en évidence l'importance de suivre en continu les paramètres physico-chimiques et chimiques (nitrates notamment) dans un bassin karstique. En effet, une arrivée importante d'eau froide a eu lieu le 3 février 2003 à la Bissaugerie et un jour plus tard

aux Glandons, probablement suite à la fonte de la neige tombée la semaine précédente (environ 15 cm). Le décalage dans le temps et la très faible amplitude observée sur le puits des Glandons lors de cette crue, notamment en température, par rapport au puits de la Bissaugerie, reflètent en fait le temps d'homogénéisation de la colonne d'eau qui est relativement long pour les Glandons.

Les concentrations en chlorures et nitrates des échantillons prélevés lors du suivi en continu depuis juillet 2002 sur le bassin des Trois Fontaines sont comprises entre 5 et 45 et entre 5 et 95 mg/l respectivement.

Les variations dans le temps des teneurs en chlorures et en nitrates sont très différentes, avec la Source et le puits des Grands Pressoirs qui sont caractérisés par des concentrations stables alors que les teneurs en nitrates augmentent légèrement sur le puits de la Bissaugerie lors d'un apport rapide d'eau atmosphérique et enfin que le puits des Glandons est caractérisé par des variations importantes de concentration en chlorures et en nitrates sur une longue période (5 mois).

D'une manière générale il existe une bonne adéquation entre les concentrations en chlorures et en nitrates mesurées par les sondes multiparamètres et analysés par chromatographie ionique dans les échantillons prélevés pour l'ensemble des sites étudiés. Cependant quelques problèmes de dérive de l'électrode de référence peuvent avoir lieu, facilement identifiables par des augmentations anormales des concentrations en chlorures et nitrates et une évolution anormale du pH. La durée de vie de électrode de référence a donc été estimée à environ 1 an. En ce qui concerne les électrodes sélectives nitrates et chlorures, un entretien minimum tous les 3 mois est suffisant (remplissage de l'électrolyte interne et nettoyage de la membrane - biofilm). De plus, ces électrodes peuvent être changées sur site si cela s'avère nécessaire (changement uniquement de la membrane sans changement du corps de l'électrode).

Enfin, l'incertitude associée à la mesure en continu des chlorures au moyen des sondes multiparamètres (1 écart type) est de l'ordre de 2 - 3 mg/l, quelque soit le niveau de concentration en chlorures (soit 7,5 - 25 %). L'incertitude associée à la mesure en continu des nitrates au moyen des sondes multiparamètres est par contre comprise entre 15 et 25 % et dépend de la concentration en nitrates.

Bibliographie

Baran N. (1996) - « Transit de l'isoproturon et de l'atrazine dans un système hydrologique karstique de la craie (Gâtinais-France) : de la station pédologique expérimentale à l'échelle du système », thèse de l'université d'Orléans.

Baran N., Mouvet C., Lepiller M. (2000) - « Transfert de phytosanitaires à l'échelle d'un système karstique », *Hydrogéologie*, 1, 4 p. 73-80.

Diamond D., McEnroe E., McCarrick M., Lewenstam A. (1994) - Evaluation of a new solid-state reference electrode junction material for ion-selective electrodes. *Electroanalysis* - 6, p. 962-971.

Guigues N., Roy S., Vaute L. (2002) - Mesure en continu *in situ* des concentrations en nitrates et chlorures dans les eaux naturelles à l'aide d'une sonde multiparamètre. BRGM/RP-51276-FR.

Guigues N., Foucher J.C. et Roy S. (2003) - Mise en place d'un mini-réseau de surveillance de la qualité des eaux sur un bassin karstique en région Centre : les Trois Fontaines. BRGM/RP-52337-FR.

Lasne E. (1992) - « Étude du système hydrologique karstique des sources des Trois Fontaines (Saint-Loup-de-Gonois, Loiret). Contribution à la connaissance de la structure, du fonctionnement et de l'évolution de l'aquifère crayeux du Gâtinais (sud-est du bassin de Paris) », thèse de l'université d'Orléans.

Annexe

Composition chimique des échantillons prélevés lors de la campagne de novembre-décembre 2003

Site	Date	Niveau statique	Profondeur totale	Profondeur sous eau	Temp	Conductivité (25°C)	O ₂	pH
		(m)	(m)	(m)	°C	μS/cm	%	
Bissaugerie	21/11/2003	31,22	33	1,8	11,2	336	0	7,5
			37	5,8	11,2	335	0	7,5
Glandons	19/11/2003	24,23	26	1,8	11,8	648	46	7,2
			31	6,8	11,8	649	48	7,2
			35	10,8	11,8	649	47	7,2
Pressoirs	20/11/2003	16,93	19	2,1	11,8	930	83	6,8
			22	5,1	11,8	954	37	6,8
			25	8,1	11,8	950	24	6,8
Tournerie	20/11/2003	21,79	24	2,2	11,9	683	36	7,2
			27	5,2	11,9	681	19	7,2
			31	9,2	11,9	680	16	7,2
Trois Chapeaux	21/11/2003	13,30	14	0,7	12,1	657	56	7,7
			17	3,7	12,1	933	42	7,1
Grands Buissons	04/12/2003	32,56	34	1,4	11,5	501	72	7,5
			36	3,4	11,6	512	40	7,5
			41	8,4	11,6	513	34	7,5
Hirlais	04/12/2003	34,57	37	2,4	11,7	554	50	7,7
			39,5	4,9	11,7	574	41	7,6
			43	8,4	11,8	574	21	7,5
Jobards	15/12/2003	27,40	31	3,6	12,2	693	67	7,2
			35	7,6	12,2	1097	10	6,9
Source	17/11/2003				12,1	605		7,09

Illustration 60 - Paramètres physico-chimiques mesurés in situ (diagraphie) lors de la campagne de novembre-décembre 2003.

Site	Date	Profondeur sous eau	Na	K	Ca	Mg	Cl	NO3	SO4	HCO3
		(m)	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mmol/l
Bissaugerie	21/11/2003	1,8	3,9	4,6	62	2,8	6,8	9,9	12,3	3,0
		5,8	3,9	4,5	60	2,6	6,8	10,1	12,3	2,9
Glandons	19/11/2003	1,8	17,2	15,2	90	5,1	19,9	41,0	33,3	4,1
		6,8	17,2	15,2	92	5,2	19,9	41,3	33,3	4,2
		10,8	17,2	15,1	93	5,2	20,2	41,8	33,3	4,3
Pressoirs	20/11/2003	2,1	14,0	11,5	165	3,9	31,9	86,8	23,7	6,7
		5,1	15,6	14,6	148	4,1	38,1	85,6	25,7	5,8
		8,1	15,9	15,0	159	4,1	38,6	85,2	25,9	6,3
Tournerie	20/11/2003	2,2	19,5	68,7	90	5,4	10,8	20,1	42,2	6,1
		5,2	11,3	67,6	87	3,9	9,9	20,7	32,3	5,6
		9,2	10,5	67,6	86	3,8	9,8	20,7	31,4	5,5
Trois Chapeaux	21/11/2003	0,7	15,2	2,3	122	4,0	7,2	31,5	41,4	5,6
		3,7	18,7	1,1	174	3,8	48,0	54,8	35,1	6,9
Grands Buissons	04/12/2003	1,4	5,6	12,3	93	3,6	14,9	27,4	14,9	4,3
		3,4	5,4	12,5	88	3,6	14,7	26,5	14,8	4,1
		8,4	5,4	12,7	84	3,6	15,0	26,9	14,7	3,9
Hirlais	04/12/2003	2,4	1,1	3,9	96	2,2	15,5	40,4	12,9	4,1
		4,9	11,3	4,2	102	2,2	15,8	36,0	13,4	4,6
		8,4	11,5	4,3	97	2,3	15,9	35,1	13,5	4,4
Jobards	15/12/2003	3,6	14,1	33,0	117	5,8	15,2	25,6	32,5	6,2
		7,6	14,5	61,7	155	6,7	48,7	104,8	16,6	7,1
Source	17/11/2003		7,13	1,62	111	2,55	18,2	53,0	10,7	4,5

Illustration 61 - Composition chimique des échantillons prélevés lors de la campagne de novembre-décembre 2003.

Site	Date	Profondeur sous eau	Atrazine	DEA	DIA
		(m)	µg/l	µg/l	µg/l
Bissaugerie	21/11/2003	1,8			
		5,8			
Glandons	19/11/2003	1,8	0,11	0,18	0,15
		6,8	0,11	0,18	0,16
		10,8	0,11	0,18	0,14
Pressoirs	20/11/2003	2,1	0,43	0,90	0,28
		5,1	0,34	0,98	0,31
		8,1	0,33	0,98	0,37
Tournerie	20/11/2003	2,2	0,01	0,04	<
		5,2	0,01	0,04	<
		9,2	0,01	0,04	0,02
Trois Chapeaux	21/11/2003	0,7	0,72	2,98	0,38
		3,7	0,37	1,14	0,12
Grands Buissons	04/12/2003	1,4	0,15	0,62	0,34
		3,4	0,16	0,59	0,37
		8,4	0,17	0,56	0,43
Hirlais	04/12/2003	2,4	0,32	0,33	0,09
		4,9	0,28	0,29	0,08
		8,4	0,31	0,30	0,07
Jobards	15/12/2003	3,6	0,66	0,97	1,05
		7,6	0,58	2,85	0,90
Source	17/11/2003		0,06	0,11	<

Illustration 62 - Teneurs en pesticides dans les échantillons prélevés lors de la campagne de novembre-décembre 2003.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Service analyse et caractérisation minérale**

3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34